Die Gleichstrommaschine: Bd. Konstruktion, Berechnung und ...

Engelbert Arnold

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Die

Gleichstrommaschine.

Ihre Theorie, Untersuchung,
Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.

Von

Dr.-Ing. E. Arnold,

Professor und Direktor des elektrotechnischen Instituts
an der großherzoglichen technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe.

Zweiter Band.

Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.

Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage.

Mit 502 Textfiguren und 13 Tafeln.

Berlin.
Verlag von Julius Springer.
1907.

Digitized by Google

Alle Rechte, insbesondere das der
Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Digitized by Google

118300
MAY 2 1908
TOB
ARG
G
2.
2
6973053

Vorwort.

Der vorliegende zweite Band ist ebenso wie der erste vollständig umgearbeitet worden. Seit dem Erscheinen der ersten Auflage hat der Bau und die Anwendung der Gleichstrommaschine namentlich infolge der Einführung der Kompensationswicklungen große Fortschritte gemacht. Die zahlreichen Vorteile, die diese Hilfsmittel bieten, sind allgemein rasch erkannt worden, als man an die Aufgabe herantrat, Gleichstrommaschinen zu bauen für große Leistungen bei hohen Umdrehungszahlen, für rasch wechselnde Betriebe mit kurzzeitigen großen Überlastungen und für Änderungen der Umdrehungszahl innerhalb weiten Grenzen durch Regulierung der Feldstärke.

Die erreichten Fortschritte sind durch zahlreiche Beispiele neuester Konstruktionen, durch die Neubearbeitung der Vorausberechnung und durch die Erweiterung der Kapitel, welche die Arbeitsweise der Gleichstrommaschine behandeln, zur Geltung gekommen.

Der mechanische Aufbau der Gleichstrommaschine ist, ebenso wie in der ersten Auflage, der Berechnung vorangestellt, denn der Bau und die Anordnung der Ankerwicklung, der Feld- und der Kompensationswicklung, die Bauarten des Ankers, sowie die Art und Stärke der Isolierung müssen bei der Vorausberechnung als bekannt vorausgesetzt werden. Die Bauart verschiedenartiger ganzer Maschinen für Leistungen von 2 bis 1720 KW, deren Hauptabmessungen und berechnete Größen in Tabellen zusammengestellt sind, wird durch 27 neue Beispiele erläutert, die in der ersten Auflage nicht enthalten sind. Im Anhang folgen weitere 14 Beispiele ausgeführter Maschinen, welche aus der ersten Auflage in die neue übernommen worden sind. Dadurch bietet das Buch auch namentlich den Studierenden ein reiches Konstruktionsmaterial.

Der Vorausberechnung liegt mit einigen Änderungen die im ersten Band gegebene Theorie zugrunde. Die Wahl der einzelnen

Digitized by Google

Größen wird ausführlich begründet und der Gang der Rechnung ist derart aufgebaut, daß man, unter beständiger Prüfung der berechneten oder angenommenen Größen auf ihre Zulässigkeit, von Stufe zu Stufe bis zur endgültigen Lösung der Aufgabe vorwärtsschreitet.

Den besten Überblick über die vollständige Berechnung einer Maschine gibt das Berechnungsformular (S. 388 bis 401). Eine Durchsicht desselben und des Beispieles für die ausführliche Berechnung einer Maschine (S. 412) lehrt, daß die vollständige und genaue Berechnung viel Zeit in Anspruch nimmt. Mit den gegebenen Hilfsmitteln sollte auch derjenige, der über keine großen Erfahrungen im Dynamobau verfügt und sich doch nicht ohne Kritik an ausgeführte Maschinen anlehnen will, imstande sein, eine technisch und wirtschaftlich gute Maschine zu entwerfen. Der erfahrene Ingenieur wird in vielen Fällen, z. B. bei vorläufigen Projekten oder wenn ausreichende Erfahrungen mit der zu berechnenden Type vorliegen, die Berechnung wesentlich kürzen können, dem gewissenhaften Anfänger kann jedoch nur eine genaue Rechnung die erwünschte Sicherheit bringen.

Die Änderungen in der Vorausberechnung gegenüber der im ersten Band gegebenen Theorie beziehen sich auf die Prüfung der Kommutation. Im ersten Band (s. S. 483) wird der Höchstwert der Summe der in allen kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMK ΔE (die maximale Kurzschlußspannung) berechnet. Abgesehen davon, daß die Berechnung etwas umständlich ist, haben eingehende experimentelle Versuche über den zeitlichen Verlauf der Kurzschlußspannung gezeigt (s. Fig. 345 und Fig. 347, S. 294 u. 295, Bd. II), daß der gemessene Höchstwert mit dem berechneten vielfach nicht einmal annähernd übereinstimmt. Das liegt daran, daß die gegenseitige Induktion der kurzgeschlossenen Spulen sich in einfacher Weise nicht genau genug berücksichtigen läßt und daß die veränderliche Form der Kurzschlußstromkurve sowie die Schwingungen und Schwankungen des Magnetfeldes eine einigermaßen zuverlässige Berechnung des Höchstwertes der Summe der in allen kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMK unmöglich machen. Es ist daher im zweiten Band von der Berechnung dieses Höchstwertes Abstand genommen worden.

Die weiteren Änderungen, welche dadurch die Theorie der Kommutation erfährt, sind leicht vorzunehmen. Es tritt dabei eine wesentliche Vereinfachung und Kürzung ein, die sich namentlich auch bei der Vorausberechnung angenehm bemerkbar macht. Ich hoffe daher, daß den Lesern und Freunden des Buches die vorgenommenen Änderungen willkommen sein werden.

Digitized by Google

Die Arbeitsweise und die damit im Zusammenhang stehenden verschiedenartigen Verwendungen der Gleichstrommaschine werden in den Kapiteln 22 bis 30 ausführlicher, als es in der ersten Auflage geschehen ist, behandelt. Die Eigenschaften der Gleichstrommaschine als Motor, die Wirkungsweise der Puffermaschinen, der Pufferaggregate, der Anlaßaggregate und ihre Anwendung zum Antrieb von Fördermaschinen und Walzenstraßen, sowie die verschiedenen Methoden der Tourenregulierung, die Gleichstrom-Kraftübertragungen und die Dreileitermaschinen werden erörtert, um zu zeigen, welch große Bedeutung die Gleichstrommaschine erlangt hat und wie es gelungen ist, sie den schwierigsten Betriebsverhältnissen hinsichtlich Belastungs- und Geschwindigkeitsänderungen anzupassen.

Bei der Bearbeitung und Drucklegung des zweiten Bandes war mir die eifrige Mitarbeit des Herrn Ing. Th. Roßkopf eine große und wertvolle Hilfe. Ich spreche ihm, sowie Herrn Dipl.-Ing. Fr. Schmittner, der mich bei Umarbeitung einiger Kapitel unterstützte und Herrn Dipl.-Ing. O. May, der sich an der Arbeit des Korrekturlesens beteiligte, auch an dieser Stelle meinen besten Dank aus.

Karlsruhe, den 28. September 1907.

E. Arnold.

Digitized by Google

Inhaltsverzeichnis.

Konstruktion der Gleichstrommaschine.

Erstes Kapitel.

Isolierstoffe.

Seite

1. Untersuchung der Isolierstoffe 1
2. Gebräuchlichste Isolierstoffe und ihre Verwendung 6
   - Natürliche Isolierstoffe und die von diesen abgeleiteten Fabrikate 7
   - Papier und andere Faserstoffe 11
   - Isolierlacke und Imprägnierstoffe 13
   - Mit Lacken und Imprägnierstoffen behandelte Faserstoffe und Gewebe 15

Zweites Kapitel.

3. Querschnittsformen der Ankerdrähte 19
4. Isolierung der Ankerdrähte 21
5. Anordnung und Isolierung der Wicklung von glatten Ankern . . . 23
6. Vorzüge und Zweck der Ankernuten 25
7. Nutenformen und Anordnung der Wicklung bei Nutenankern . . . 26
8. Isolierung der Wicklung von Nutenankern 28
9. Lackieren, Trocknen und Verkleiden des Ankers 36

Drittes Kapitel.

Konstruktion des Ankerkörpers.

10. Ankerkern und Isolierung der Ankerbleche 37
11. Lüftung des Ankerkernes 38
12. Ankerkörper für Trommelanker 40
13. Ankerkörper für Ringanker 44
14. Befestigung des Ankers auf der Welle 45

Viertes Kapitel.

Konstruktion des Kommutators.

15. Allgemeines über die Konstruktion des Kommutators 46
16. Material und Gestalt der Lamellen 46
17. Isolierung des Kommutators 47
18. Beispiele von Kommutatorkonstruktionen 48

Digitized by Google

Fünftes Kapitel.

Seite
19. Bürsten und Bürstenhalter 53
20. Bürstenträger und Stromableitungen 62

Sechstes Kapitel.

Die Ankerwicklung.

21. Konstruktion von Ringankern 69
22. Trommelanker mit von Hand ausgeführter Drahtwicklung 71
23. Trommelanker mit Drahtwicklung aus Formspulen 76
24. Trommelanker mit Stabwicklung 98
25. Befestigung der Wicklung 104
26. Die Verbindung der Ankerdrähte mit dem Kommutator 107
27. Anordnung der Äquipotentialverbindungen 110
28. Querschnitt und Anzahl der Äquipotentialverbindungen 113

Siebentes Kapitel.

Magnetgestell und Magnetwicklung.

29. Material der Feldmagnete 115
30. Befestigung des Polschuhes mit dem Magnetkern und des Magnetkernes mit dem Joch. Jochquerschnitte 117
31. Material und Form der Wendepole und Wendepolwicklungen . . . 119
32. Spulenkasten und Magnetspulen 122
33. Anordnung der Doppelschlußwicklung 126

Achtes Kapitel.

Prüfung der Isolation und Ausbalancierung.

34. Prüfung der Isolation 128
35. Ausbalancierung der rotierenden Teile 131

Neuntes Kapitel.

Lagerkonstruktionen.

36. Einteilung der Lager 134
37. Gleitlager 135
38. Kugellager 143

Zehntes Kapitel.

39. Beispiele ausgeführter Maschinen 147
1. Vereinigte Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Wien. Motor, 2,6 PS, 2550 Umdr. pro Min. 147
2. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 8 PS, 750 Umdr. pro Min. 149
3. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 12 PS, 2600 Umdr. pro Min. 152
4. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 50 KW, 725 Umdr. pro Min. 152
5. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 125 PS, 430 Umdr. pro Min. 154
6. Siemens-Schuckertwerke. Generator, 150 KW, 500 Umdr. pro Min. 156
7. Ganz'sche Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft. Generator, 107,5 KW, 225 Umdr. pro Min. 159

Digitized by Google

Seite

8. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Motorgenerator, 350 KW, 500 Umdr. pro Min. 162
9. Maschinenfabrik Oerlikon. Umformer, 560 KW, 333 Umdr. pro Min. 164
10. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 210 KW, 120 Umdr. pro Min. 165
11. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator, 600 KW, 276 Umdr. pro Min. 167
12. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Generator, 275 KW, 125 Umdr. pro Min. 169
13. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 270 KW, 100 Umdr. pro Min. 171
14. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 400 KW, 125 Umdr. pro Min. 172
15. Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth, Münchenstein-Basel. Generator, 900 KW, 100 Umdr. pro Min. 174
16. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi. Fördermotor, 280 PS, 0—30 Umdr. pro Min. 174
17. Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf. Hochspannungsgenerator, 270 KW, 300 Umdr. pro Min. 177
18. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Kompound-Regulier-Dynamo, 0—75 KW, 680 Umdr. pro Min. 179
19. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Turbogenerator, 65 KW, 3000 Umdr. pro Min. 183
20. Maschinenfabrik Oerlikon. Turbogenerator, 500 KW, 2000 Umdr. pro Min. 186
21. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Generator, 1100 KW, 94 Umdr. pro Min. 188
22. Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft. Motor, 80 PS, 310—620 Umdr. pro Min. 189
23. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie. Turbogenerator, 250 KW, 3000 Umdr. pro Min. 193
24. Siemens-Schuckertwerke, G. m. b. H. Turbomotor, 200 PS, 4000 Umdr. pro Min. und Turbogenerator, 170 KW, 3000 Umdr. pro Min. 200
25. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Turbogenerator, 400 KW, 3000 Umdr. pro Min. 200
26. Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft. Turbogenerator, 200 KW, 2800 Umdr. pro Min. 203
27. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator, 1720 KW, 355 Umdr. pro Min. 203

Berechnung der Gleichstrommaschine.

Elftes Kapitel.

40. Allgemeines über die Vorausberechnung 204
41. Grundlagen der Vorausberechnung 205
A. Generatoren 205
B. Motoren 206
42. Wahl der Hilfsmittel für die Kommutierung (Wendepole und Kompensationswicklung) 208
43. Wahl der Ankerkonstruktion 211
44. Wahl der Ankerwicklung 212
45. Umfangsgeschwindigkeit und Tourenzahl 217
46. Wahl des Verhältnisses von Ankerlänge zu Polbogen 219

Digitized by Google

Seite

47. Wahl der Polzahl 221
48. Ableitung der Formeln zur Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine 223
49. Größe der linearen Belastung AS und ihr Einfluß auf die Gewichte, die Verluste, den Wirkungsgrad und die Kommutierung 225

Zwölftes Kapitel.

50. Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine 233
51. Berechnung der Eisenlängen l und l_1 und des Polbogens b 236
52. Berechnung der Zahl der Ankerdrähte und der Zahl der Lamellen des Kommutators 238
53. Berechnung des Querschnittes q_a der Ankerdrähte 241
54. Berechnung der Nuten 243
55. Berechnung der Eisenhöhe h des Ankers 245
56. Abmessungen des Kommutators und der Bürsten 247
Der Durchmesser des Kommutators 250
Die Kontaktfläche der Bürsten 250
Die Bürstenbreite 251
Die Länge des Kommutators 252

Dreizehntes Kapitel.

57. Größe des Luftspaltes δ und Bohrung der Feldmagnete 253
58. Entwurf des Magnetgestelles 256
59. Vorläufige Berechnung des Wicklungsraumes der Erregerwicklung . 258
60. Berechnung der Erregung 259
61. Berechnung einer Nebenschlußwicklung 260
62. Berechnung einer Hauptschlußwicklung 263
63. Berechnung einer Doppelschlußwicklung 264

Vierzehntes Kapitel.

64. Die vom Ankerfeld in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK . 267
a) Glatter Anker 267
b) Nutenanker 272
65. Berechnung des Wendefeldes und der Wendepole 281
Kraftflußverteilung bei der Anordnung von $2p$ Wendepolen 282
Kraftflußverteilung bei der Anordnung von p Wendepolen 283
66. Form und Stärke des Wendefeldes 284
67. Stabilität des Wendefeldes 287
68. Nachrechnung der Maschine bezüglich Kommutierung 288
a) Maschinen ohne künstliche Kommutation 288
b) Maschinen mit künstlicher Kommutation 292
69. Einige experimentell ermittelte Kommutationskurven 293
70. Berechnung der Polschuhform und der Feldkurven 296

Fünfzehntes Kapitel.

Festigkeitsberechnungen.

71. Festigkeit des Konstruktionsmaterials 302
72. Beanspruchung durch die Fliehkraft 303
73. Beanspruchung der verschiedenen Konstruktionsteile 305

Digitized by Google

Sechzehntes Kapitel.

Berechnungsbeispiele.

Seite

74. Ausführliche Berechnung eines Doppelschlußgenerators, 500 KW, 100 Umdr. pro Min. 312
75. Nachrechnung eines Doppelschlußgenerators mit Wendepolen, 650 KW, 100 Umdr. pro Min. 344
76. Berechnung eines Wendepolmotors, 15 PS, 200 — 1200 Umdr. pro Min. 357
77. Berechnung eines Hauptstromgenerators, 600 KW, 300 Umdr. pro Min. 372

Siebzehntes Kapitel.

78. Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung von Gleichstrommaschinen 386
79. Tabelle über Hauptabmessungen und berechnete Größen ausgeführter Maschinen 402

Arbeitsweise der Gleichstrommaschine.

Achtzehntes Kapitel.

80. Anlauf eines Motors 408
81. Anlaufzeit, Anlaufstromstärke und Anlaufverlust 412
82. Stufung der Anlaßwiderstände 416
83. Gang der Berechnung eines Anlaßwiderstandes 421
84. Berechnung der Bremswiderstände 422

Neunzehntes Kapitel.

85. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zum Konstanthalten der Spannung bei veränderlicher Belastung 426
86. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zur Veränderung der Spannung 430
87. Regulierwiderstände für Motoren 433

Zwanzigstes Kapitel.

88. Die Bemessung von Metallwiderständen 437
89. Flüssigkeitswiderstände 444

Einundzwanzigstes Kapitel.

90. Das Ausschalten der Erregerwicklung 445
91. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren 447
92. Widerstandsapparate für Motoren ohne Umkehrung der Drehrichtung 448
a) Für Nebenschlußmotoren 448
b) Für Hauptschlußmotoren 452
93. Widerstandsapparate für Motoren mit Umkehrung der Drehrichtung 453
a) Für Nebenschlußmotoren 453
b) Für Hauptschlußmotoren 457

Zweiundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren für konstante (oder annähernd konstante) Klemmenspannung bei konstanter Tourenzahl.

94. Anwendungsgebiet 460
Maschinen für Beleuchtung 460

Digitized by Google

Seite

Maschinen für Bahnbetrieb 462
Maschinen für metallurgische Zwecke 464
95. Parallelschaltung von Nebenschlußgeneratoren 465
96. Parallelschaltung von Doppelschlußgeneratoren 468

Dreiundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren für annähernd konstante Klemmenspannung bei konstantem äußerem Widerstande und veränderlicher Tourenzahl.

97. Allgemeines 474
98. Anordnung von G. G. Milne und Generator von M. Milch 475
99. Querfelddynamo von Rosenberg 477
100. Maschine von M. Osnos 483

Vierundzwanzigstes Kapitel.

Motoren für konstante Klemmenspannung.

101. Motoren für konstante Klemmenspannung und Nebenschlußerregung 485
102. Motoren für konstante Klemmenspannung und Hauptschlußerregung 487
103. Motoren für konstante Klemmenspannung und Doppelschlußerregung 488

Fünfundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren und Motoren für konstante Stromstärke. Kraftübertragungssystem Thury.

104. Generatoren für konstante Stromstärke 489
105. Motoren für konstante Stromstärke 490
106. Kraftübertragungssystem Thury 490

Sechsundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren und Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke. Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke.

107. Generatoren zum Laden von Akkumulatoren 497
108. Zusatzmaschinen 499
109. Sonstiges Verwendungsgebiet der Generatoren für veränderliche Spannung und Stromstärke 501
110. Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke 502
111. Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke . 502

Siebenundzwanzigstes Kapitel.

Ausgleich stark veränderlicher Belastungen durch Puffersysteme.

112. Allgemeines 505
113. Wirkungsweise einer Pufferbatterie 505
114. Anwendung von Zusatzmaschinen bei Pufferbatterien 507
a) Vorschaltung einer Hauptstrommaschine vor die Batterie 508
b) Puffermaschine nach Jacob 508
c) Puffermaschine von Highfield 508
d) Pirani-Puffermaschine 509
115. Wirkungsweise der Pufferaggregate 509
116. Verfahren zur Tourenänderung des Puffermotors 513
117. Konstruktive Durchbildung des Pufferaggregates 516

Digitized by Google

Achtundzwanzigstes Kapitel.

Verfahren zum Anlassen und zur Tourenregulierung von Motoren mit Nebenschluß- oder Fremderregung.

Seite

118. Das Anlassen 518
119. Anlaßschaltungen 519
1. Einschaltung von Widerständen vor den Anker 519
2. Serie- und Parallelschaltung von zwei Motoren 519
3. Anschließen des Motors an verschiedene Spannungen einer Akkumulatorenbatterie 519
120. Anlassen mittelst Anlaßaggregat 519
1. Anlassen mittelst besonderen Generators 520
Förderanlage auf dem Ottiliaeschacht der kgl. Berginspektion Klausthal 520
Förderanlage Zollern II der Gelsenkirchner Bergwerks-A.-G. Merklinde 522
Elektrische Walzenzuganlage auf der Hildegardehütte 524
2. Anlassen mittelst Vorschaltung einer Anlaßmaschine 528
Förderanlage für die Compagnie des Mines de Ligny-les-Aire . . 529
3. Anlaßaggregat für Dreileiternetze 531
121. Verfahren zur Tourenregulierung 532
122. Tourenregulierung durch Änderung der zu induzierenden EMK . . 532
1. Schaltung von Widerständen vor den Anker 532
2. Anschließen an verschiedene Spannungen einer Akkumulatorenbatterie 533
3. Anschließen an ein Dreileiternetz mit zwei verschiedenen Spannungen 534
4. Anwendung besonderer Regulieraggregate 534
123. Tourenregulierung durch Änderung des Kraftflusses 537
124. Tourenregulierung durch Änderung der Windungszahl 538
125. Tourenregulierung durch Änderung der Polzahl 538
126. Tandem-Anlaß- und Regulierverfahren 538

Neunundzwanzigstes Kapitel.

127. Verfahren zum Anlassen und Tourenregulierung von Hauptschlußmotoren 542
A. Durch Änderung der induzierten EMK 542
1. Schaltung eines Widerstandes vor den Anker 542
2. Serie- und Parallelschaltung von zwei Motoren 543
B. Durch Änderung des Kraftflusses 544
a) Durch Anordnung eines Regulierwiderstandes (Shunt) parallel zur Erregerwicklung 544
b) Durch Abschalten von einzelnen Windungen der Erregerwicklung 544
c) Durch Serie- und Parallelschaltung der Erregerspulen 544

Digitized by Google

Dreißigstes Kapitel.

Seite

128. Das Dreileitersystem 547
129. Spannungsteilung durch Akkumulatoren und Ausgleichmaschinen . 548
130. Maschinen mit zwei Ankerwicklungen und zwei Kommutatoren . . 551
131. Spannungsteilung, System von Dolivo-Dobrowolsky 551
132. Dreileitermaschine von Ossanna 554
133. Dreileitermaschine von Dettmar 556

Anhang.

Einunddreißigstes Kapitel.

134. Weitere Beispiele ausgeführter Maschinen 559
1. A.-G. Volta, Reval. Generator, 4 KW, 1300 Umdr. pro Min. . . 559
2. A.-G. Volta, Reval. Motor, 2 PS, 900 Umdr. pro Min. 561
3. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 23 KW, 950 Umdr. pro Min. 563
4. Maschinenfabrik Oerlikon. Hauptschlußgenerator, 132 KW, 475 Umdr. pro Min. 565
5. Maschinenfabrik Oerlikon. Kapselmotor, 3 PS, 1400 Umdr. pro Min. 566
6. Union E.-G., Berlin. Kapselmotor, 8 PS, 400 Umdr. pro Min. . . 569
7. Siemens & Halske A.-G., Berlin. Kapselmotor, 12 PS, 635 Umdr. pro Min. 571
8. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator mit vertikaler Welle, 100 KW, 150 Umdr. pro Min. 573
9. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Generator, 150 KW, 500 Umdr. pro Min. 575
10. Stè. Electricité et Hydraulique, Charleroi. Bahngenerator, 500 KW, 100 Umdr. pro Min. 575
11. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co., Prag. Bahngenerator, 500 KW, 90 Umdr. pro Min. 578
12. E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Nebenschlußgenerator, 1000 KW, 94 Umdr. pro Min. 579
13. E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Doppelgenerator, 1400 KW, 110 Umdr. pro Min. 581
14. Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin. Generator, 1320 KW, 85 Umdr. pro Min. 583
135. Nachtrag.
Bemerkungen zu Seite 269 586
Bemerkungen zu Seite 279 587

Namen- und Sachregister 590
Erklärung der in den Formeln verwendeten Buchstaben 596

Digitized by Google

Verzeichnis der Tafeln.

Tafel I. Maschinenfabrik Oerlikon. Umformer, 560 KW, 330 Umdr. pro Min.

Tafel II. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 270 KW, 100 Umdr. pro Min.

Tafel III. Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth, Münchenstein-Basel. Generator, 900 KW, 100 Umdr. pro Min.

Tafel IV. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Turbogenerator, 65 KW, 3000 Umdr. pro Min.

Tafel V. Maschinenfabrik Oerlikon. Turbogenerator, 500 KW, 2000 Umdr. pro Min.

Tafel VI. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Generator, 1100 KW, 94 Umdr. pro Min.

Tafel VII. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Turbogenerator, 250 KW, 3000 Umdr. pro Min.

Tafel VIII. Stè. Electricité et Hydraulique, Charleroi. Bahngenerator, 500 KW, 100 Umdr. pro Min.

Tafel IX. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co., Prag. Bahngenerator, 500 KW, 90 Umdr. pro Min.

Tafel X. E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Nebenschlußgenerator, 1000 KW, 94 Umdr. pro Min.

Tafel XI. E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Doppelgenerator, 1400 KW, 110 Umdr. pro Min.

Tafel XII. Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin. Generator, 1320 KW, 85 Umdr. pro Min.

Tafel XIII. Magnetisierungskurven verschiedener Eisensorten.

Digitized by Google

Erstes Kapitel.

Isolierstoffe.

1. Untersuchung der Isolierstoffe. — 2. Gebräuchlichste Isolierstoffe und ihre Verwendung.

1. Untersuchung der Isolierstoffe.

Läßt man auf einen Isolierstoff eine gewisse Spannung einwirken, so werden nach Maßgabe der dielektrischen Eigenschaften Ströme in ihm auftreten, durch welche eine Erwärmung und zugleich eine Strukturveränderung veranlaßt wird.

Die Fähigkeit, eine gewisse Spannung auszuhalten, ohne daß infolge dieser Änderungen eine Entladung durch den Isolierstoff hindurch, d. h. ein Durchschlag erfolgt, wird als Isolierfestigkeit bezeichnet.

Die Isolierfestigkeit kann man durch die Größe der Durchschlagspannung, bezogen auf 1 mm Stärke des Isolierstoffes, ausdrücken. Diese Größe wird als Durchschlagsfestigkeit bezeichnet.

Die Durchschlagsfestigkeit ist nicht nur von den mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes abhängig, sondern auch in hohem Maße von der Temperatur, dem Feuchtigkeitsgrad, der Dicke und der Art des Zusammenbaues (ob aus mehreren Schichten oder aus einem Stück) und von der Versuchsanordnung, d. h. von der Art der Spannung, der Periodenzahl (wenn eine Wechselspannung verwendet wird), der Form und dem Anpressungsdruck der Elektroden und der Dauer der Einwirkung der Spannung.

Vor der Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit ist somit festzustellen, welchen Einfluß diese verschiedenen Faktoren haben.

Der Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur wurde schon früh untersucht und zwar wohl deshalb, weil man fand, daß der Isolationswiderstand durch diese Faktoren sehr stark be-

Digitized by Google

einflußt wird. Die Kurve[1]) der Fig. 1 gibt ein drastisches Beispiel von dem Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur auf den Isolationswiderstand. Sie wurde an einem Stück von 0,38 mm starkem Baumwolltuch beobachtet. Der aufsteigende Ast zeigt wie der Isolationswiderstand beim Entweichen der Feuchtigkeit zunimmt, während der abfallende Ast die Abnahme des Widerstandes bei zunehmender Temperatur zeigt.

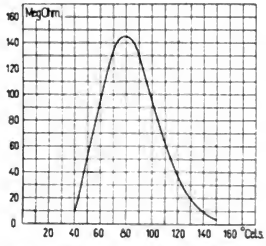


Fig. 1. Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur auf den Isolationswiderstand.

Der Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur auf die Durchschlagsfestigkeit ist bedeutend kleiner als ihr Einfluß auf den Isolationswiderstand, wie die Fig. 2 u. 3 zeigen.[2])

Die Kurve *A*, Fig. 2, gibt die Durchschlagspannung für rohe Pappe, während die Kurve *B* sich auf denselben Isolierstoff in völlig ausgetrocknetem Zustande bezieht.

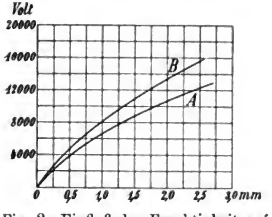


Fig. 2. Einfluß der Feuchtigkeit auf die Durchschlagsfestigkeit.
Kurve A: Rohe Pappe.
Kurve B: Ausgetrocknete Pappe.

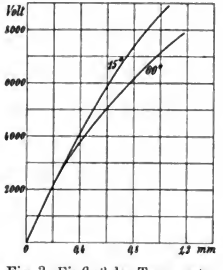


Fig. 3. Einfluß der Temperatur auf die Durchschlagsfestigkeit.

Die Kurven der Fig. 3 wurden für geöltes Leinen erhalten.

Der Einfluß der Temperatur ist, wie aus diesen Kurven hervorgeht, nicht groß, vorausgesetzt, daß man mit der Temperatur nicht so hoch geht, daß der Isolierstoff sich verändert.

[1]) Nach Sever, Abonell & Perry. Trans. Am. Inst. Elec. Eng. Vol. XIII. S. 227.

[2]) Nach Turner und Hobart, „Die Isolierung elektrischer Maschinen."

In den Kurven dieses Kapitels ist, wenn nicht besonders angegeben, die Spannung immer als Effektivwert aufgetragen.

Digitized by Google

Über den Einfluß der Art der Spannung hat die Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf[1]) eingehende Versuche gemacht. Bei den Untersuchungen mit Preßspan und Marmor stellte sich heraus, daß diese Isolierstoffe eine Gleichstromspannung aushielten, etwa doppelt so groß, als die effektive Wechselspannung, bei welcher ein Durchschlag auftrat. Die Kurve der Wechselspannung war am Scheitel deutlich abgeflacht. Der Scheitelfaktor betrug 1,255.

Die Durchschlagsversuche werden fast immer mit Wechselspannung vorgenommen, weil hohe Wechselspannungen leichter zu erzeugen sind.

Über den Einfluß der Kurvenform der Wechselspannung auf die Durchschlagsfestigkeit liegen zurzeit noch keine systematischen Versuche vor. Es ist jedoch wohl anzunehmen, daß bei gleichem Effektivwert der Isolierstoff eine höhere Isolierfestigkeit bei einer abgeflachten als bei einer spitzen Kurvenform aufweist.

Der Einfluß der Periodenzahl ist zwischen 20 und 75 Perioden nicht groß. Die Durchschlagsfestigkeit soll jedoch nach den Versuchen von E. H. Rayner mit Abnahme der Periodenzahl abnehmen.

Der Einfluß der Form und des Anpressungsdruckes der Elektroden und der Dauer der Einwirkung der Spannung wurde eingehend von C. Kinzbrunner[2]) untersucht. Durch Feststellung der Durchschlagsfestigkeit für spitze, kugelförmige und flache Elektroden fand er, daß diese Festigkeit sich um so kleiner ergibt, je größer der Kugelradius gewählt wird.

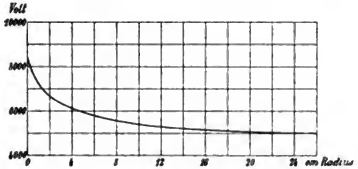


Fig. 4. Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit vom Kugelradius der Elektroden.

In Fig. 4 ist für 1 mm starken Preßspan die Durchschlagsfestigkeit in Abhängigkeit des Kugelradius der Elektroden aufgetragen. Der Radius 0 entspricht einer Spitze, der Radius ∞ einer Platte. Weitere Versuche mit flachen Elektroden zeigten, daß für kleine Elektroden die Durchschlagspannung mit abnehmendem Durchmesser wächst, jedoch für Durchmesser über 3 cm von der Größe der Elektrode unabhängig ist.

Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von dem Anpressungsdruck. Die Beobachtungen wurden an Preßspan gemacht.

[1]) ETZ 1904. S. 841.
[2]) Z. f. E. 1905. S. 549.

Digitized by Google

Aus der Kurve sieht man, daß, etwa von einem Druck von 0,25 kg/cm² ab aufwärts, die Durchschlagsfestigkeit vom Drucke unabhängig ist. Das gleiche Resultat ergaben Untersuchungen an anderen ebenfalls nicht zusammendrückbaren Isolierstoffen.

Trägt man die Durchschlagspannung in Abhängigkeit von der Dauer der Einwirkung auf, so erhält man nach Kinzbrunner Kurven, die den in Fig. 6 aufgezeichneten Verlauf aufweisen. Die Kurven dieser Figur beziehen sich auf 0,35 mm starkes getränktes Papier, und zwar gibt Kurve *I* die Durchschlagspannung für eine Lage, Kurve *II* für vier Lagen und Kurve *III* für sieben Lagen.

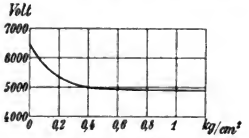


Fig. 5. Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Anpressungsdruck.

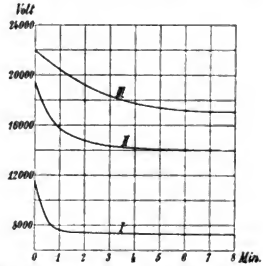


Fig. 6. Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Dauer d. Einwirkung.

Über eine bestimmte Zeit hinaus verlaufen die Kurven parallel zu der *X*-Achse. Die Zeit, bei welcher dieser parallele Verlauf anfängt, wurde durch Kinzbrunner als Zeitkonstante bezeichnet. Man wird, um den kleinsten Wert für die Durchschlagsfestigkeit zu erhalten, somit die Dauer des Versuches länger als die Zeitkonstante nehmen müssen. Die Zeitkonstante ist abhängig von der Dicke und Anzahl der Lagen der Probe und vom Isolierstoff selbst.

Als Zusammenfassung seiner Untersuchungen über den Einfluß der Versuchsanordnung stellt Kinzbrunner folgende Regeln für die Bestimmung der Durchlagspannung auf.

1. Die zu verwendenden Elektroden sollen flach sein und abgerundete Ecken haben. Die Berührungsfläche soll mindestens gleich 5 cm² sein.

2. Der Druck der oberen Elektrode auf den Isolierstoff soll mindestens 0,25 kg/cm² betragen.

3. Die Kurve der Wechselspannung soll möglichst sinusförmig sein.

4. Die Periodenzahl der Wechselspannung soll zwischen 20 und 70 liegen.

5. Die Prüfung des Isolierstoffes soll in ungetrocknetem Zustande bei einer Temperatur von zirka 17° C und normaler Luftfeuchtigkeit (zirka 50 bis 70%) erfolgen.

Digitized by Google

6. Die Prüfungsdauer, bezw. die Zeitdauer der Elektrisierung soll sich nach der Qualität und Stärke des betreffenden Isolierstoffes richten.

Über den Einfluß der Dicke der Probe auf die Durchschlagsfestigkeit sind die meisten Autoren insoweit gleicher Ansicht, daß bei zunehmender Dicke des Isolierstoffes die Durchschlagsfestigkeit abnimmt. Ob man hier jedoch von einem bestimmten Gesetze reden kann, ist nicht sicher.

Aus den sorgfältig durchgeführten Versuchen von Kinzbrunner scheint für kleinere Dicken (bis etwa 5 mm) die Durchschlagspannung proportional mit der Quadratwurzel aus der Dicke zuzunehmen, so daß man schreiben kann

$$V = C\sqrt{d},$$

worin V die Durchschlagspannung in eff. Volt, d die Dicke in mm und C eine vom Isolierstoff abhängige Konstante ist.

Baur[1]) leitet aus eigenen und anderen Versuchen ab, daß die Formel

$$V = Cd^{\frac{2}{3}}$$

die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Dicke des Isolierstoffes zum Ausdruck bringt. Es sei bemerkt, daß eine der Kurven, welche Baur als Beweis für die Richtigkeit seiner Formel bringt, nämlich die für Paraffin, fast genau die Formel $V = 27500\sqrt{d}$ nach Kinzbrunner befriedigt.

Für größere Dicken oder längere Luftstrecken scheint nach Versuchen von Steinmetz und Walter

$$V = a + bd$$

zu sein, worin a und b Konstanten sind.

Der Einfluß der Anzahl der Schichten wurde von verschiedenen Autoren untersucht. Kinzbrunner fand, daß je nach dem Isolierstoff die Durchschlagspannung proportional der Schichtenzahl oder proportional der Quadratwurzel aus der Schichtenzahl sei.

Um den **Einfluß hoher Temperatur bei längerer Einwirkung** auf die verschiedenen Isolierstoffe festzustellen, wurden von dem National Physical Laboratory und von den Firmen Crompton & Co. und Siemens Bros. & Co. Untersuchungen angestellt.

Sehr interessant sind die Untersuchungen von Siemens Bros. & Co., welche die Isolierstoffe während 12 Monaten einer Temperatur von 125° C aussetzten.

Es wurde untersucht: Imprägniertes Segeltuch, Asbest, Mikanit, Preßspan, Empire Cloth, imprägnierter Kaliko, Kaliko mit Insula-

[1]) ETZ 1904. S. 7.

Digitized by Google

ting Varnish, Kaliko mit Voltalack, und Ohmulite (eine Art Hartgummi).

Von diesen Isolierstoffen hielten nur Asbest, Mikanit und Ohmulite die Temperatur während eines Jahres ohne zu starke Beschädigung aus, obwohl auch bei diesen eine deutliche Abnahme der mechanischen Eigenschaften wahrzunehmen war. Die Faserstoffe gehen bei längerer Einwirkung einer Temperatur von 100° zugrunde.

2. Gebräuchlichste Isolierstoffe und ihre Verwendung.

Die Anforderungen, welche man an einen guten Isolierstoff stellt, können folgendermaßen zusammengefaßt werden. Er soll

1. möglichst hohe und an allen Stellen gleiche Isolierfestigkeit,
2. geringe Abhängigkeit der Isolierfestigkeit von der Temperatur und Hitzebeständigkeit besitzen,
3. nicht hygroskopisch,
4. unempfindlich gegen Säuren,
5. widerstandsfähig gegenüber den bei der Verarbeitung und den Erschütterungen während des Betriebes auftretenden mechanischen Beanspruchungen,
6. frei von Substanzen, welche die zu isolierenden Metallteile gefährden (oxydieren, anfressen) sein.

Allen diesen Anforderungen wird kein Isolierstoff vollkommen entsprechen, sondern nur einigen von ihnen. Für einen bestimmten Zweck müssen daher unter den zahlreichen Isolierstoffen die am besten geeigneten ausgewählt werden; hierbei kommen auch die Kosten und die Raumbeanspruchung in Betracht.

Zur Isolierung finden Isolierlacke und Imprägnierstoffe in großem Maße Verwendung, und zwar in einigen Fällen, um den hiermit behandelten Isolierstoff zu schützen gegen Öle, Wasser, Säure und dergl. und dauerhafter zu machen, in anderen Fällen direkt als Isolation, indem dann die Stoffe, die imprägniert werden, nur als Träger für den Lack dienen.

Wir können somit folgende Isolierstoffe unterscheiden:

1. Natürliche Isolierstoffe und von diesen abgeleitete Fabrikate.
2. Papier und andere Faserstoffe.
3. Lacke und Imprägnierstoffe.
4. Mit Lacken und Imprägnierstoffen behandelte Faserstoffe und Gewebe.

Digitized by Google

Natürliche Isolierstoffe und die von diesen abgeleiteten Fabrikate.

Von diesen kommen hier hauptsächlich in Betracht: Glimmer, Glimmerfabrikate, Asbest, Gummi und dessen Ersatzfabrikate.

Glimmer[1]) (Mika) ist ein natürliches Silikat von Aluminium und Kalium oder Natrium. Er kristallisiert in blättriger Form und läßt sich in der Längsrichtung sehr leicht spalten, wobei man Blätter von 0,006 mm Dicke erhalten kann. Sein hoher Preis ist begründet in dem großen Abfall, der bei der Bearbeitung des Rohstoffes auftritt.

Er besitzt die besten Isoliereigenschaften, ist gegenüber hohen Temperaturen beständig und absorbiert keine Feuchtigkeit.

Obwohl bester rötlicher Glimmer an einigen Stellen einer $^1/_{10}$ mm starken Platte 12000 Volt aushalten kann, ist der Mittelwert der Durchschlagspannung in der Regel viel geringer.

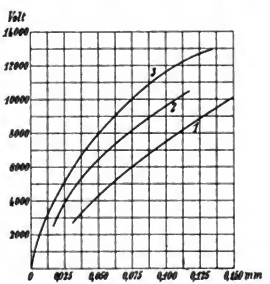


Fig. 7. Durchschlagspannungen von Glimmer.

Die Kurven Fig. 7 zeigen die Durchschlagspannungen für verschiedene Stärken. Kurve 1 wurde von O'Gorman, Kurve 2 von Steinmetz, Kurve 3 von der Dielectric Mfg. Co. aufgenommen. Sie entsprechen etwa den Formeln $V = 22000\sqrt{d}$, $= 28000\sqrt{d}$ und $= 35000\sqrt{d}$.

Da Glimmerplatten nur in beschränkter Größe vorkommen und größere Stücke sehr teuer sind, so werden im Dynamobau, besonders für Kommutatoren, Glimmerfabrikate aus gespaltenem Glimmer hergestellt, welche unter den Namen: Mikanit, Megohmit und Megotale bekannt sind.

Mikanit wird hergestellt, indem man ganz kleine Glimmerblättchen unter hohem Druck und hoher Temperatur mit einem isolierenden Kitt oder Lack verklebt. Der Zweck des Lackes ist weiter, bei Erwärmung ein Gleiten der einzelnen Plättchen gegeneinander zu ermöglichen. Auf diese Weise kann das erwärmte

[1]) Es ist bei der Zusammenstellung der Eigenschaften der Isolierstoffe das Buch „Die Isolierung elektrischer Maschinen" von Turner und Hobart öfters benutzt worden. Mit dieser Angabe soll auf einen jedesmaligen Hinweis auf diese Quelle verzichtet werden.

Digitized by Google

Mikanit in jede beliebige Form gebracht werden, welche es nach der Abkühlung beibehält.

Das Mikanit wird von verschiedenen Firmen und meistens in zwei Ausführungsarten hergestellt, und zwar eine mit höherer Isolierfestigkeit und Hitzebeständigkeit, und eine andere, bei welcher die Isolierfestigkeit und Hitzebeständigkeit kleiner sind, wobei der Isolierstoff sich jedoch besser biegen läßt.

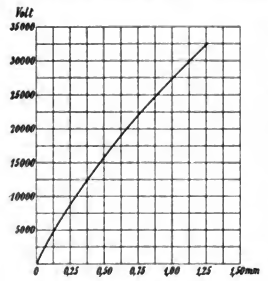


Fig. 8. Durchschlagspannungen von Mikanit.

Die Kurve Fig. 8 entspricht Mittelwerten der Durchschlagspannung von Mikanit.

Viele Glimmerfabrikate erleiden eine wesentliche Einbuße, wenn sie mit Maschinenöl in Berührung kommen. Farrington schreibt die zerstörende Wirkung nur dem als Bindemittel benutzten Lacke zu. Nach seiner Ansicht vereinigt sich das Öl beim Eindringen in den Lack mit gewissen Bestandteilen des Lackes. Hierdurch werden die Säuren, welche die meisten Lacke enthalten, frei und bilden mit dem Kupfer Salze, welche die Glimmerschicht durchsetzen.

Megohmit ist ein ähnliches Fabrikat wie Mikanit, jedoch wird ihm der verwendete Klebstoff soweit wie möglich wieder entzogen, so daß es weniger empfindlich gegenüber Maschinenöl ist. Außerdem soll diese Entziehung des Klebstoffes, wie die Fabrikanten angeben, den Vorteil haben, daß es nicht wie Mikanit den Klebstoff bei hohen Temperaturen ausschwitzt. Die Kurve Fig. 9 wurde Angaben der Firma Meirowsky & Comp. entnommen.

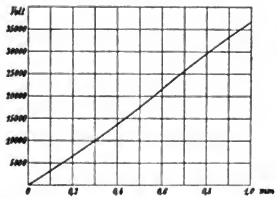


Fig. 9. Durchschlagspannungen von Megohmit.

Megotalc wird ebenfalls aus kleineren Glimmerplatten mittelst eines speziell dazu präparierten Lackes hergestellt. Es können alle möglichen Fassonstücke hergestellt werden. Auch wird ein flexibler Megotalc in Stärken von 0,15 mm an fabriziert. Nach Versuchen der Phys. Techn. Reichsanstalt ist die Durchschlagspannung für eine 0,5 mm starke Megotaleplatte 23000 Volt.

Überall dort, wo Glimmer bezw. Glimmerfabrikate nicht in

Digitized by Google

Form von Fassonstücken, wie z. B. bei Kommutatoren, Nutenröhren, Spulenkörpern usw. verwendet werden, kombiniert man sie mit Papier oder mit verschiedenen Sorten von Geweben. Es entstehen dadurch die unter den verschiedensten Namen bekannten **Mikanitpapiere, Mikanitleinwand, Mikanitcloth** usw. Diese Sorten sind jedoch in bezug auf die Isolierfestigkeit mehr oder weniger inhomogen und dürfen daher nur mit Vorsicht verwendet werden, z. B. muß bei Isolierung kantiger Gegenstände ganz besondere Rücksicht auf Überlappungen und Überdeckungen des Isolierstoffes genommen werden.

Aus Versuchen verschiedener Firmen und Versuchen, die im hiesigen E. T. I. vorgenommen wurden, kann als Durchschlagspannung für

Mikanitpapier

von 0,2 mm Dicke	. . . .	1000—3500 Volt
0,32 mm Dicke	. . . .	2000—4300 Volt

und für Mikanitleinwand

von 0,2—0,3 mm Dicke	. . . .	1000—3500 Volt
0,5 mm Dicke	. . . .	1000—6000 Volt

angesehen werden.

Asbest wird seiner Feuerbeständigkeit wegen verwendet. In feuchten Betrieben bei Spannungen über 250 Volt ist er wegen seiner hygroskopischen Eigenschaften nur mit Vorsicht zu gebrauchen. Die Durchschlagspannung einer 2,0 mm dicken trockenen Asbestplatte beträgt 1000—3500 Volt.

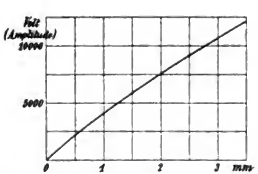


Fig. 10. Durchschlagspannungen von Vulkanasbest.

Vulkanasbest erhält man, wenn man Asbest mit einer gewissen Gummisorte vermengt. Dieser Isolierstoff bleibt bis zu Temperaturen von 300° C unverändert. Die mechanische Widerstandsfähigkeit des Vulkanasbests ist größer als die des reinen Asbests.

Die Kurve Fig. 10 wurde von Steinmetz[1]) ermittelt.

Ätnamaterial, das aus Asbest und Schellack besteht, wird hauptsächlich für Isolierstücke verwendet, die auf Zug beansprucht werden. Es wird für Hülsen, Büchsen und Anschlußklemmen gebraucht. Es widersteht großer Hitze ohne Veränderung, ist aber

[1]) Trans. Am. Inst. Elec. Eng. 1893, S. 64.

Digitized by Google

etwas brüchig. Die Durchschlagsfestigkeit soll nach Symons[1]) 11000 Volt sein.

Hartgummi (Ebonit) ist ein vorzüglicher Isolator, der auch mechanische Beanspruchung gut aushält, jedoch Wärmeeinflüssen gegenüber sehr wenig widerstandsfähig ist. Bei 70° C wird er schon weich, bei 80° C flüssig. Gegenüber Feuchtigkeit der Luft verhält sich Hartgummi mittelmäßig.

Hartgummiblätter und Stäbe können, ohne daß die Isolierfestigkeit leidet, auf einen Krümmungsradius, der gleich der drei- bis vierfachen Dicke ist, gebogen werden.

In Kurve 1, Fig. 11, sind die Durchschlagspannungen für verschiedene Stärken nach den Versuchen von Kinzbrunner[2]) aufgetragen. Kurve 2, Fig. 11, gilt für Weichgummi, Kurve 3 für Guttapercha. Diese Kurven entsprechen annähernd den Formeln $V = 28\,500\sqrt{d}$ (Kurve 1), $V = 21\,000\sqrt{d}$ (Kurve 2), $V = 19\,000\sqrt{d}$ (Kurve 3).

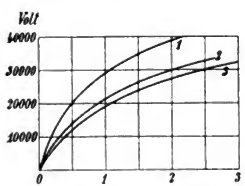


Fig. 11. Durchschlagspannungen von Hartgummi (Kurve 1), Weichgummi (Kurve 2) und Guttapercha (Kurve 3).

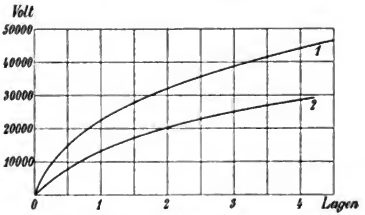


Fig. 12. Durchschlagspannungen von Hartgummi (Kurve 1) u. Guttapercha (Kurve 2) in Abhängigkeit von der Schichtenzahl.

In Fig. 12 sind für Hartgummi (Kurve 1) und Guttapercha (Kurve 2) die Durchschlagspannungen in Abhängigkeit von der Schichtenzahl aufgezeichnet. Diese Kurven zeigen ebenfalls einen quadratischen Verlauf.

Als Ersatz für das teure Hartgummi kommen das schon genannte Ätnamaterial und andere Spezialfabrikate, deren Zusammenstellung meistens Fabrikationsgeheimnis ist, wie Stabilit, Ambroin, Cornit, Pecolit u. a. in Betracht.

Stabilit (A. E.-G.) wird in Platten, Stangen und Röhren, sowie in runden Scheiben, Büchsen und komplizierten Formstücken hergestellt und läßt sich in gleicher Weise wie Hartgummi bearbeiten. Es ist bei seiner Zusammenstellung besonders darauf geachtet, daß

[1]) Technics, Dez. 1904.
[2]) Z. f. E. 1905, S. 665.

Digitized by Google

es nicht hygroskopisch sei. Die Durchschlagsfestigkeit einer Platte von 1 mm Stärke beträgt 10000 bis 15000 Volt.

Ambroïn (Vereinigte Isolatorenwerke, Berlin-Pankow) besteht aus fossilen Kopalen und Silikaten, es nimmt im Freien so gut wie gar keine Feuchtigkeit auf. Eine Verwitterung des Ambroins ist unmöglich. Weiter ist es erheblich billiger als Hartgummi und widerstandsfähiger gegen höhere Temperaturen.

Eine 0,34 mm starke trockene Platte Ambroin wurde bei 5000 Volt noch nicht durchgeschlagen.

Cornit ist ein ähnliches Fabrikat wie Stabilit. Es ist nicht hygroskopisch, sehr hitzebeständig und deformiert sich bei einer Temperatur bis zu 250° C nicht.

Pecolit (Persicaner & Co., Berlin-Wien) besteht nach Angaben der liefernden Firma aus einer Kautschukmischung. In warmem Zustand läßt es sich mäßig biegen. Als oberste Temperatur wird 70 bis 80° C angegeben.

Eine 0,95 mm starke Platte wurde bei 18000 Volt durchgeschlagen.

Papier und andere Faserstoffe.

Papier und andere Faserstoffe werden wegen des dichten gleichmäßigen Gewebes sehr viel zu Isolierzwecken benutzt, und zwar entweder allein oder in Verbindung mit anderen Stoffen, z. B. Glimmer.

Als beste Papiersorten bezüglich der elektrischen und mechanischen Eigenschaften gelten Manila-, Pack- und Hanfpapier; auch das sogen. rote Hanfpapier wird sehr viel verwendet.

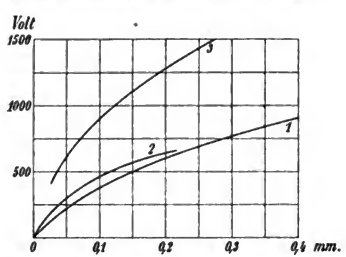


Fig. 13. Durchschlagspannungen von grauem (Kurve 1) und gelbem (Kurve 2) Isolierpapier und von Manilapapier (Kurve 3).

Kurve 1, 2 und 3, Fig. 13, zeigen die Durchschlagspannungen von grauem und gelbem Isolierpapier und von Manilapapier für verschiedene Stärken.

Sie sind der Arbeit von Kinzbrunner entnommen und entsprechen annähernd bezw. den Gleichungen

$$V = 1450\sqrt{d},\ V = 1800\sqrt{d} \text{ und } V = 2800\sqrt{d}.$$

Digitized by Google

Die Durchschlagspannung nimmt für geringe Dicken des Papiers proportional der Schichtenzahl und bei dickerem Papier langsamer als proportional der Schichtenzahl zu.

Roter und vulkanisierter Fiber wird hauptsächlich seiner mechanischen Eigenschaften wegen verwendet. Er nimmt jedoch sehr leicht Feuchtigkeit aus der Luft auf. Unter Wärme getrocknet, verbessert er seine Isolierfestigkeit, wird aber brüchig.

Gut getrockneter, vulkanisierter Fiber hält in Dicken von 20 mm zirka 10000 Volt aus.

Preßspan ist infolge seiner glatten ebenen Oberfläche und der gleichmäßigen Struktur ein sehr guter Isolierstoff. Preßspan muß vollständig getrocknet werden, bevor er zur Verwendung gelangt. Er ist gegenüber mechanischen Beanspruchungen sehr widerstandsfähig und kann, ohne daß seine Isolierfestigkeit leidet, auf einen Krümmungsradius gleich der fünffachen Dicke gebogen werden.

Um Preßspan gegen Feuchtigkeit widerstandsfähiger zu machen, wird er in reinem, doppelt gekochtem, durch Benzin verdünntem Leinöl bei zirka 100 bis 110° C. gekocht. Die Dauer des Kochens ist je nach der Dicke verschieden: 0,5 mm Dicke benötigt 12, 1 mm 18 Stunden.

Die Kurven 1, 2 und 3, Fig. 14, wurden von Kinzbrunner aufgenommen. Sie bestätigen das von ihm aufgestellte Gesetz (siehe S. 5). Kurve 1 entspricht lichtbraunem ($V = 3800\sqrt{d}$), Kurve 2 gelbbraunem ($V = 4400\sqrt{d}$) und Kurve 3 dunkelbraunem Preßspan ($V = 5600\sqrt{d}$). Die Kurve 3 stimmt mit der von Lewis aufgenommenen Kurve überein.

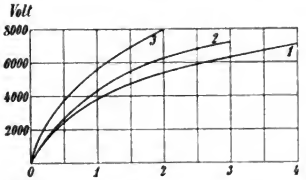


Fig. 14. Durchschlagspannungen für Preßspan. Kurve 1: lichtbrauner, Kurve 2: gelbbrauner, Kurve 3: dunkelbrauner Preßspan.

Von anderen Untersuchern wurde die Durchschlagsfestigkeit bedeutend höher gefunden, so fand Holitscher für die Durchschlagsfestigkeit von sieben verschiedenen Fabrikaten einen Mindestwert von 11000 Volt bei 1 mm Stärke. Symons fand für zwei Proben eine Durchschlagsfestigkeit von 13000 und 19000 Volt bei 1 mm Stärke. Wahrscheinlich ist dieser Unterschied der Feuchtigkeit zuzuschreiben, da Kinzbrunner den Isolierstoff bei einem Feuchtigkeitsgrade von 70% untersuchte, während die beiden letzteren Untersucher die Versuche an getrockneten Platten ausführten.

Digitized by Google

Nach Kinzbrunner wächst die Durchschlagspannung ebenfalls mit der Quadratwurzel aus der Schichtenzahl, so daß es hier weniger Vorteil bietet, die Isolierung aus mehreren dünnen Schichten aufzubauen.

Isolit, Adit und Asolit müssen schließlich noch erwähnt werden. Die beiden ersten bestehen aus einer Art Preßpappe, die imprägniert und mit einem Speziallack überzogen ist. Asolit[1]) scheint ein dem vulkanisierten Fiber ähnliches Produkt mit einer besonderen Imprägnierung zu sein. Alle diese Isolierstoffe werden hauptsächlich für Spulenkasten verwendet.

Isolierlacke und Imprägnierstoffe.

Im Dynamobau werden die zur Nuten- und Stabisolation gebräuchlichen Isolierstoffe nie in reinem Zustande, sondern erst nachdem sie mit besonderen Lacken, Firnissen, Ölen u. dgl. behandelt wurden, verwendet. Diese haben in erster Reihe die Aufgabe, den Isolierstoff gegen Feuchtigkeit, Öl, Säure zu schützen und die Isolation mechanisch widerstandsfähiger zu machen. Weiter dienen sie in anderen Fällen zur direkten Isolierung, indem die Faserstoffe oder Gewebe, welche imprägniert werden, nur als Träger für die Lacke und Öle dienen.

Von einem Lack muß man folgendes fordern:

1. Er muß eine ununterbrochene, dichte und gleichmäßige Schicht geben.
2. Er muß elastisch sein und darf nicht reißen, brechen, sich abschälen oder durch Erschütterungen zerstört werden.
3. Er soll durch Temperatur und Alter nicht beeinträchtigt werden.
4. Er darf nicht unter 200° C flüssig werden.
5. Er darf nicht durch Wasser, Säuren und Öl leiden.
6. Er darf keine Säuren enthalten, die zerstörend oder fressend wirken.
7. Mit Rücksicht auf billige Fabrikation muß er möglichst schnell trocknen.

Von trocknenden Ölen kommen hauptsächlich Leinöl und einige Nußöle in Betracht.

Leinöl dehnt sich beim Trocknen aus und füllt daher alle Poren. Auf diese Weise ist Feuchtigkeit ausgeschlossen, außerdem wird die Isolierfestigkeit des getränkten Stoffes bedeutend erhöht. Bevor die zu imprägnierenden Isolierstoffe in das Leinöl getaucht

[1]) Nach Mitteilung der Isola-Werke Oerlikon-Zürich.

Digitized by Google

werden, sollten sie im Vakuumofen getrocknet werden, dann 24 Stunden in dem Leinöl bleiben und schließlich in einem Ofen mit Luftzutritt bei nicht über 70° C getrocknet werden.

Sterling Varnish ist ein dickflüssiger Lack, der lediglich aus konzentriertem Leinöl und Terpentin oder Benzin mit geringem Harzzusatz zu bestehen scheint. Er hat eine sehr hohe und gleichmäßige Durchschlagsfestigkeit und gibt eine feste, aber biegsame und elastische Decke.

Ein Fehler der Leinöllacke besteht darin, daß die Säure des Leinöls das Kupfer angreift und weiter, daß Schmieröl auf Leinöl und mit Leinöllack imprägnierte Isolation zersetzend einwirkt. Der Angriff des Kupfers macht sich durch grüne Färbung bemerkbar, die sogar durch Glimmer hindurchdringt und dickes Packpapier imprägniert.

Armalack hat die Fehler des Leinöls nicht, weil er eine ganz andere Zusammensetzung hat. Er ist ein schwarzes Paraffinwachs in einer Lösung von Petroleum-Naphta. Er enthält keine Harzsäure, greift somit das Kupfer nicht an und ist unempfindlich gegen Schmieröl.

Formspulen taucht man am besten in Armalack und hängt sie dann für kurze Zeit in einen Trockenofen oder etwa eine halbe bis eine ganze Stunde an die Luft, dann können sie direkt gebogen und eingesetzt werden. Der Nachteil des Armalackes ist, daß er unter dem Einfluß hoher Temperaturen und großer Zentrifugalkräfte aus den Wicklungen hervorquillt oder herausgeschleudert wird.

Dielectrol ist ebenfalls ein Paraffinlack.

Elektralack[1]) wird nicht auf dem sonst üblichen Wege durch Oxydation, sondern durch einen Vorgang, der als Polymerisation bezeichnet wird, aus Ölen hergestellt, und zwar ohne Harzzusatz. Das Trocknen kann bei jeder Temperatur geschehen, nur geht das Trocknen bei höherer Temperatur bis zu 300° C schneller vor sich. Innerhalb dieser weiten Temperaturgrenzen verharzt der Lack einmal wie das andere Mal. Für die Trocknung im Ofen braucht er, je nach der Größe der Anker und Spulen, 4 bis 8 Stunden. Er wird durch Alkalien und Säuren nicht angegriffen, ist sehr elastisch und verhindert durch seinen homogenen Überzug das Eindringen von Feuchtigkeit.

Excelsiorlack[2]) soll schnell trocknen, vollkommen unempfindlich gegen Witterungseinflüsse, heißes und kaltes Öl und Alkalien sein. Der Lack hält dauernd die bei Maschinen auftretenden Tempera-

[1]) Nach einer Veröffentlichung der Deutschen Elektralack-Fabrik, Bruchsal, Baden.

[2]) Nach einer Veröffentlichung von Meirowsky & Co., Köln-Ehrenfeld.

Digitized by Google

turen aus ohne spröde zu werden; er verkürzt die Gewebe und Papierfasern nicht, imprägniert vollkommen und füllt alle Hohlräume aus; er ruft keine Grünspanbildung am Kupfer hervor.

Elektro-Emaille und **Armalack Putty** müssen noch erwähnt werden. Obwohl ihre Isolierfähigkeit etwas geringer ist als bei den anderen Imprägnierstoffen, so haben sie den Vorteil, daß sie die Ableitung der Wärme aus dem Inneren der Spule erleichtern.

Mit Lacken und Imprägnierstoffen behandelte Faserstoffe und Gewebe.

Die Faserstoffe und Gewebe sollten nicht ohne Imprägnierung mit wasserdichtem Lack verwendet werden, da sie sonst bald Feuchtigkeit aufnehmen.

Man kann die Faserstoffe und Gewebe auf zwei Arten benutzen. Erstens lediglich als Träger der Isoliermasse, indem man sie in erwärmtem Zustande durch einen dickflüssigen Isolierlack zieht, so daß nur die Oberfläche mit dem Lack bedeckt wird, oder zweitens, indem man den ganzen Stoff mit einer Substanz tränkt, die beim Trocknen alle Poren ausfüllt. Das erste Verfahren kann man mit Tränken, das zweite mit Imprägnieren bezeichnen.

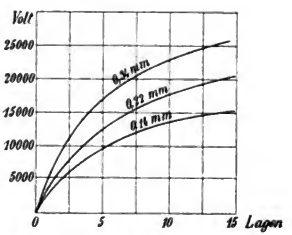


Fig. 15. Durchschlagspannungen von getränktem Papier.

Die Fig. 15 und 16 geben nach Kinzbrunner die Durchschlagspannung von **getränktem Papier** bezw. **schwarzem, imprägniertem Papier** in Abhängigkeit von der Lagenzahl. Die Kurven der

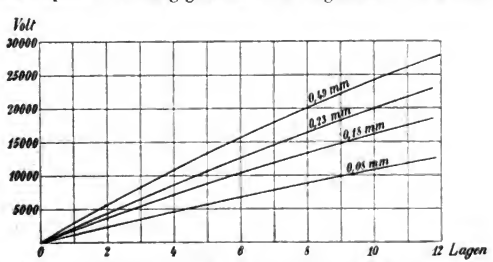


Fig. 16. Durchschlagspannungen von schwarzem, imprägniertem Papier.

Digitized by Google

Fig. 15 haben einen quadratischen Charakter, während die Kurven der Fig. 16 fast geradlinig verlaufen.

Fig. 17 zeigt nach Turner und Hobart die Durchschlagspannung für **geölten Preßspan** von verschiedenen Stärken. Die Kurve entspricht etwa der Gleichung $V = 10000\sqrt{d}$.

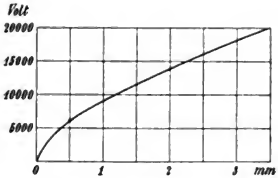


Fig. 17. Durchschschlagspannungen für geölten Preßspan.

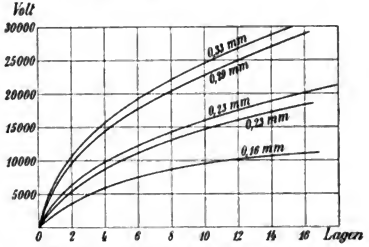


Fig. 18. Durchschlagspannungen für getränkte Leinwand.

Als Gewebe sind diejenigen Stoffe empfehlenswert, welche eine möglichst glatte Oberfläche haben, man wird daher die besten Resultate erzielen, wenn der Stoff gebügelt oder besser noch gesengt wird. Der Stoff muß frei von Chlor sein. Am besten geeignet sind Baumwolle, Musselin und Batist.

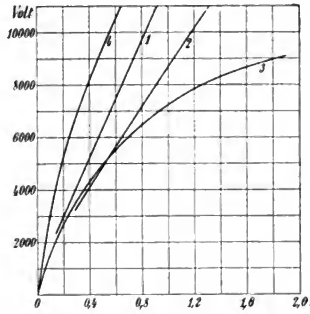


Fig. 19. Durchschlagspannungen für Empire Cloth (Kurve 1 und 2), geöltes Segeltuch (Kurve 3) und hellgelbes Öltuch (Kurve 4).

Die Kurven Fig. 18 wurden von Kinzbrunner für **getränkte Leinwand** aufgenommen.

Die Kurven 1 und 2, Fig. 19, entsprechen Untersuchungen von O'Gorman mit **Empire Cloth**, einem mehrfach mit Leinöl behandelten Batist.

Die Kurve 3, Fig. 19, entspricht den Untersuchungen von Dr. Thomson mit **geöltem Segeltuch.**

Die Kurve 4, Fig. 19, wurde von Symons mit **hellgelbem Öltuch Nr. 2** erhalten.

Schließlich sei in Fig. 20 eine Zusammenstellung der Versuche

Digitized by Google

von Kinzbrunner gegeben, aus welcher die Isolierfestigkeit der verschiedenen Isolierstoffe gut zu ersehen ist.

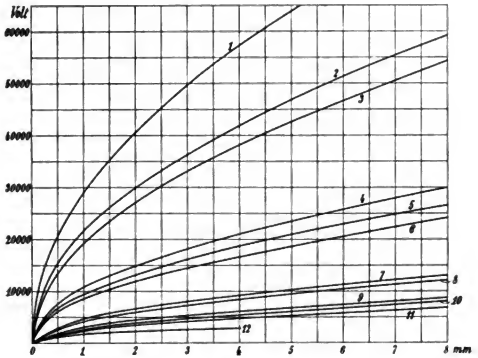


Fig. 20.

1. Hartgummi.
2. Weichgummi.
3. Guttapercha.
4. Getränkte Leinwand.
5. Red-Rope Papier.
6. Empire Cloth.
7. Preßspan.
8. Imprägniertes Papier.
9. Leatheroid.
10. Manilapapier.
11. Fiber.
12. Papier (trocken).

Der **Grad der Sicherheit,** den man bei der Verwendung eines Isolierstoffes zugrunde legen muß, wird bestimmt durch die Homogenität des Isolierstoffes und der Abhängigkeit desselben von mechanischen Beanspruchungen, Temperatur und Feuchtigkeit. Für Isolierstoffe, die in geringen Dicken und für niedere und mittlere Spannungen verwendet werden, wird die Dicke so zu wählen sein, daß das Verhältnis von

$$\frac{\text{mittlerer Durchlagspannung}}{\text{Spannung, für welche eine Gefährdung nicht eintritt}} = 5 \text{ bis } 10$$

und für größere Dicken und hohe Spannungen gleich 3 bis 6 wird.

Manche Firmen geben auch für die Höchstbeanspruchung ihres Isolierstoffes diejenige Spannung an, welche er bei einer bestimmten Dicke dauernd aushält, ohne sich um mehr als 3° C über die Lufttemperatur zu erwärmen. Bei Mikanit und Hartgummifabrikaten entspricht diese Spannung ungefähr einem Drittel bis Sechstel der Durchschlagspannung.

In Fig. 21 sind Kurven für Mikanitplatten (Kurve 1) und ge-

Digitized by Google

ölte Leinwand (Kurve 2) angegeben, aus welchen für verschiedene Dicken die Spannungen zu ersehen sind, für welche während des Versuchs eine bemerkbare Erwärmung des Isolierstoffes und der Elektroden eintritt. (Maschinenfabrik Oerlikon.) Während Mikanit erst bei dem 6- bis 8-fachen Wert der Spannung durchgeschlagen wird, bei dem eine Erwärmung eintritt, erfolgt bei geölter Leinwand der Durchschlag schon bei dem ungefähr 2-fachen Wert dieser Spannung.

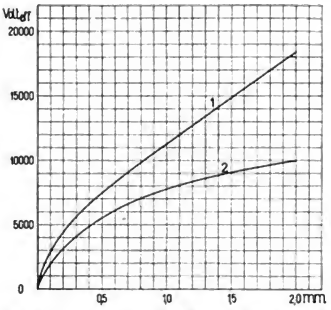


Fig. 21. Abhängigkeit zwischen Dicke des Isolierstoffes und der Spannung, bei welcher eine merkbare Erwärmung auftritt.
Kurve 1: Mikanitplatten. Kurve 2: Geölte Leinwand.

Bei Isolierstoffen mit sehr großer Durchschlagsfestigkeit treten vor dem Durchschlagen Oberflächenentladungen auf, die, wenn die Oberfläche des Isolierstoffes klein im Verhältnis zur Stromberührungsfläche ist, zu einem Überspringen der Funken zwischen den Elektroden führen. So sind nach Steinmetz,[1]) bei Glimmerplatten von 0,19 mm Dicke die Oberflächenfunken bei einer Spannung von 13550 Volt zirka 7,6 cm lang.

Man muß daher bei Isolierstoffen, die sehr hohen Spannungen standhalten sollen, nicht bloß auf die Dicke Rücksicht nehmen, sondern auch für eine möglichst große Isolationsoberfläche sorgen.

[1]) ETZ 1893, S. 248.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

3. Querschnittsformen der Ankerdrähte. — 4. Isolierung der Ankerdrähte. — 5. Anordnung und Isolierung der Wicklung von glatten Ankern. — 6. Vorzüge und Zweck der Ankernuten. — 7. Nutenformen und Anordnung der Wicklung bei Nutenankern. — 8. Isolierung der Wicklung von Nutenankern. — 9. Lackieren, Trocknen und Verkleiden des Ankers.

3. Querschnittsformen der Ankerdrähte.

Die verschiedenen Wicklungsarten, die gute Ausnutzung eines gegebenen Wicklungsraumes, die Größe der Stromstärke im Drahte, die Entstehung von Wirbelströmen in massiven Leitern von großem Querschnitte und andere Gründe führen den Konstrukteur zu verschiedenen Querschnittsformen der Ankerdrähte. In Fig. 22 sind verschiedene gebräuchliche Querschnittsformen abgebildet.

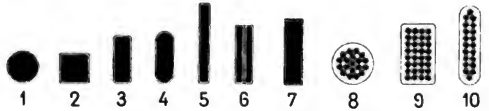


Fig. 22. Querschnittsformen von Ankerdrähten.

Für Drahtwicklungen ist der runde Querschnitt der geeignetste; die Ausführung einer Wicklung mit rundem Draht macht weniger Arbeit, und die Isolation wird weniger gefährdet als bei Verwendung von Flachdraht oder quadratischem Draht.

Für Stabwicklungen werden dagegen meistens rechteckige oder quadratische Stäbe benutzt; namentlich für Nutenanker sind diese Querschnitte geeignet.

Durch das sich ändernde Nutenfeld werden in den Leitern EMKe induziert, die Wirbelströme hervorrufen. Bei Leitern von großem Querschnitt können diese Wirbelströme beträchtlich werden und die Belastungsgrenze und den Wirkungsgrad wesentlich er-

Digitized by Google

niedrigen. Das Nutenfeld können wir uns in ein Längsfeld und ein Querfeld zerlegt denken (S. 654, Bd. I). Dem Längsfeld können wir ausweichen, indem wir den oberen Rand des Kupferstabes von dem oberen Nutenrand genügend weit entfernt halten. Das Querfeld läßt sich dagegen nicht abschirmen; um dessen Einfluß genügend klein zu halten, darf die Zahnsättigung nicht zu hoch gewählt werden, und wir müssen Kupferstäbe von beträchtlicher Höhe quer zur radialen Richtung der Nut teilen.

Die Teilung des Querschnittes, wie unter 6, Fig. 22, angegeben, bringt somit wenig Vorteil. Die Teilung soll wie unter 7, Fig. 22, angegeben, vorgenommen werden.

Diese Spaltung des Querschnittes hat nur geringen Erfolg, wenn die Stäbe an beiden Enden verlötet werden, weil die in den parallelen Streifen induzierten EMKe verschieden sind und einen inneren Strom erzeugen, der sich durch die Lötstellen schließt. Bildet dagegen jeder Streifen für sich eine ganze Windung und kreuzen sich die Streifen einer Windung nicht beim Übergange von einem Pole zum andern, so wird die Entstehung von inneren Strömen verhindert.

Das letztere gilt auch für Drahtlitzen, bei denen die Drähte verdrillt sind (Fig. 22, Nr. 8, 9, 10).

Die Drahtlitzen lassen sich in quadratische und rechteckige Querschnittsformen walzen, wodurch eine bessere Raumausnutzung der Nut erreicht wird, was um so wichtiger ist, weil die Raumausnutzung der Litze nur 70 bis 75 % beträgt.

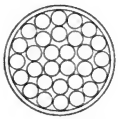


Fig. 23.

Fig. 24.

Die Raumausnutzung der Litzen ohne und mit Seele ist in den nachfolgenden Tabellen angegeben. Litzen, die weniger als 70 % Raumausnutzung besitzen, sind als minderwertig zu betrachten.[1])

Litzen ohne Seele (Fig. 23).

Anzahl Drahtlagen	1	2	3	4	5
Anzahl der Drähte in der äußersten Lage	4	10	16	22	28
Gesamtzahl der Drähte	4	14	30	52	80
Raumausnutzung in %	69,0	72,4	72,9	73,7	74,0

[1]) Siehe ETZ 1902. „Über die Raumausnutzung von Litzen." Von Ing. Dr. P. Holitscher.

Digitized by Google

Litzen mit Seele (Fig. 24).

Anzahl Drahtlagen . . .	1 (Seele)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anzahl der Drähte in der äußersten Lage	1	6	12	18	24	30	36	42	48	54
Gesamtzahl der Drähte .	1	7	19	37	61	91	127	169	217	271
Raumausnutzung in % .	100	77,7	76	75,6	75,3	75,2	75,2	75,2	75,2	75,2

Durch den Drall der Litzen geht ebenfalls etwas an Raum verloren, und der Widerstand wird wegen der Vergrößerung der Drahtlänge erhöht. Da jedoch der Drall nur 1 bis 3 % beträgt, so darf sein Einfluß vernachlässigt werden.

4. Isolierung der Ankerdrähte.

Die Ankerdrähte werden auf einen gut isolierten Ankerkörper oder in isolierte Nuten gelegt, außerdem muß noch für eine gute Isolierung der einzelnen Drähte und eine gute Isolierung der Ankerspulen unter sich Sorge getragen werden.

Als Ankerdraht verwendet man meistens zwei- oder dreimal besponnenen, oder ein- oder zweimal besponnenen und einmal beklöppelten, möglichst weichen Kupferdraht von höchster Leitungsfähigkeit.

Schellackierte Drähte wurden früher im Dynamobau viel benutzt; jetzt ist man von deren Verwendung vielfach abgekommen. Durch das Schellackieren wird die Durchschlagsfestigkeit kleiner, ferner verhindert es das Ansaugen von Lack seitens der Umspinnung; außerdem ist zu beachten, daß das Schellackieren den Fabrikanten verleiten kann, ein schlechteres Material zur Umspinnung zu benutzen. Der Schellack hatte den Zweck, die mechanische Verletzung der Bespinnung beim Wickeln zu verhüten, man hilft sich jetzt dadurch, daß man den Draht mit festem Paraffin bestreicht.

Der Platz auf der Ankeroberfläche muß mit möglichster Sparsamkeit an Isolation ausgenutzt werden, denn jeder verschwendete Raum bedeutet eine verminderte Leistung der Maschine. Die doppelte Bespinnung ist die gebräuchlichste, die dreifache Bespinnung oder die ein- und zweifache Bespinnung mit Beklöppelung kommt bei höheren Spannungen und mechanischer Beanspruchung des Drahtes, wie z. B. bei Straßenbahnmotoren und Ankern mit Handwicklung, in Betracht. Die Dicke der Bespinnung ist aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich, gewöhnlich wird eine Bespinnung mit 60er und 50er Baumwolle gewählt.

Digitized by Google

Durchmesserzunahme durch die Umspinnung.

Umspinnung mit ungebleichter Baumwolle Nr.	160	100	60	50
1 mal umsponnen	0,1 mm	0,13 mm	0,17 mm	0,20 mm
2 „ „	0,2 „	0,26 „	0,32 „	0,40 „
3 „ „	0,30 „	0,39 „	0,51 „	0,60 „
1 „ umsponnen 1 „ umklöppelt	0,60 „	0,63 „	0,67 „	0,70 „
2 „ umsponnen 1 „ umklöppelt	0,70 „	0,76 „	0,82 „	0,90 „

Für flache Drahtquerschnitte ist zu berücksichtigen, daß die Bespinnung auf der flachen Seite nicht fest anliegt; die Isolation trägt daher hier bis $2 \times 0{,}05 = 0{,}1$ mm mehr auf, als auf der Hochkantseite.

Bei der Berechnung des Raumbedarfes für die Drähte ist noch etwa 0,05 bis 0,1 mm pro Draht zuzugeben.

Um eine bessere Raumausnutzung gegenüber Baumwolldrähten zu erreichen, werden durch die A. E.-G. Emaildrähte[1]) in den Handel gebracht. Die Isolation dieser Drähte bildet ein isolierender Überzug, der ein emailartiges Aussehen besitzt, obwohl er sich von den in üblicher Weise mit diesem Namen bezeichneten Stoffen durch seine vollkommene Biegsamkeit auszeichnet. Emaildraht wird zunächst bis zu einem Durchmesser von 1,5 mm hergestellt. Er ergibt einen höheren Füllungsfaktor als sämtliche Baumwolldrähte und ist bis 0,8 mm Durchmesser auch dem einfach mit Seide besponnenen Draht überlegen. Die Dicke der isolierenden Schicht beträgt im Mittel nur 0,015 bis 0,025 mm, je nach dem Durchmesser des Drahtes. Die Durchschlagspannung zweier miteinander verseilter Drähte von 1,2 mm Durchmesser gegeneinander beträgt in trockenem Zustande 2500 bis 3000 Volt. Die Isolation ist unempfindlich gegen Feuchtigkeit, Säure und höhere Temperaturen, jedoch nicht widerstandsfähig gegen Alkalien. Sie eignet sich somit gut für dünne Magnetdrähte.

Leiter von großem Querschnitt werden von nackten Kupferstangen abgeschnitten, auf Schablonen in die Spulenform gebogen und dann von Hand oder mittels einer Wickelmaschine isoliert. Zur Isolierung dienen Streifen von Baumwolltuch, das mit einem Isolierlack getränkt ist, Streifen von Ölleinwand und Ölpapier, die mit Überlappung spiralförmig oder kanalförmig um den Stab gewickelt werden.

[1]) Nach einer Veröffentlichung der A. E.-G.

Digitized by Google

5. Anordnung und Isolierung der Wicklung von glatten Ankern.

Die Wicklung muß sehr sorgfältig gegen eine Berührung mit dem Ankerkörper geschützt werden. Zu dem Zwecke wird der letztere mit einem isolierenden Lackanstrich versehen und dann mit Isolierstoff bekleidet. Hierzu werden zähes Papier, Baumwolltuch, gummiertes Tuch, Fiberpapier, Fiber, Holz, Stabilit, Glimmer, Mikatuch, Mikanit und andere Isolierstoffe verwendet.

Zur Isolierung der Seitenflächen können Ringe aus Holz, Fiber oder Stabilit verwendet werden, oder man bekleidet sie mit mehrfachen Lagen aus Papier, gummiertem Tuch, Mikatuch, Baumwolle usf., welche mit Lack bestrichen und festgeklebt werden.

Während an den Seitenflächen und bei Ringankern an den Innenflächen des Eisenkernes die Isolation meist reichlich bemessen werden kann, muß man am Umfange des Ankers sparsamer damit sein, weil es hier auf eine gute Ausnützung des Raumes wesentlich ankommt.

Am äußeren Umfange werden glatte Anker mit mehrfachen Lagen von Isolierstoff bedeckt. Für Spannungen bis 200 Volt genügt z. B. eine mehrfache Lage von zähem Papier von 0,5 bis 0,75 mm Stärke; 2 bis 3 mm starke Papierlagen genügen bis zu Spannungen von 2000 Volt. Für so hohe Spannungen verwendet man besser Mikatuch, oder Mika und Papier in abwechselnden Lagen.

Die Isolierstoffe, welche den Ankerkörper bedecken, dürfen nirgends stumpf zusammenstoßen, sondern es ist sorgsam darauf zu achten, daß keine Fugen entstehen, welche wegen ungenügender Oberflächenisolierung leicht zu Kurzschlüssen oder Erdschlüssen Veranlassung geben können. An den Ecken, wo der Isolierstoff gebogen wird, ist er stärker zu halten.

In den Fig. 25 bis 28 sind zunächst mehrere Anordnungen der Ankerdrähte für glatte Trommelanker angegeben. In Fig. 25 haben wir eine Lage Runddraht. Wird die Zahl der Runddrähte für eine Lage zu viel, aber für zwei Lagen zu wenig, so gelangt man zu einer Wicklung mit Flachdraht, der hochkant gewickelt wird, oder auch zu Quadratdraht (Fig. 26).

In Fig. 27 haben wir zwei Lagen Runddraht, die einzelnen Spulen sind durch Fiberstege voneinander isoliert, und in Fig. 28 zwei Lagen quadratischen Draht.

Für Ringanker wird zunächst die Spulenzahl zweckmäßig als ein Vielfaches der Speichenzahl des Ankersternes gewählt.

Die Zahl der Drahtlagen wird am inneren Umfange gewöhnlich größer als am äußeren. In den Fig. 29 bis 31 sind einige ge-

Digitized by Google

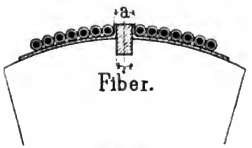


Fig. 25.

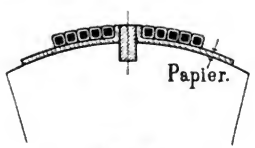


Fig. 26.

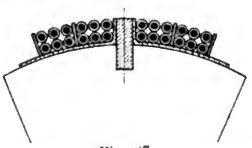


Fig. 27.

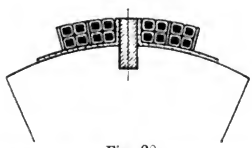


Fig. 28.

Fig. 25 bis 28. Anordnungen der Ankerdrähte bei glatten Trommelankern.

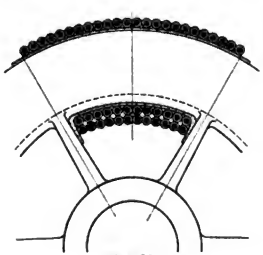


Fig. 29.

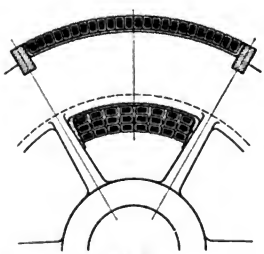


Fig. 30.

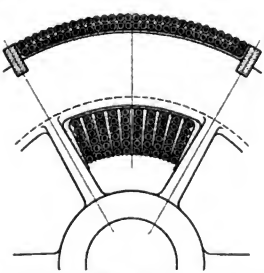


Fig. 31.

Fig. 29 bis 31. Anordnungen der Ankerdrähte bei glatten Ringankern.

Digitized by Google

bräuchliche Anordnungen der Drähte für glatte Ringanker aufgezeichnet. Flachdraht kann, wie in Fig. 30 angegeben, außen hochkant und innen flach gewickelt werden oder umgekehrt. Für Maschinen mit hohen Spannungen werden die Drähte einer Spule am innern Umfange in besondere, aus Isolierstoff (Fiber, Preßspan, Baumwolle mit Glimmereinlage usw.) hergestellte Kanäle gewickelt (Fig. 31).

Ein Verschieben der Drähte auf der Ankerfläche wird durch sogenannte Treibstützen verhindert. Sie bestehen aus 4 bis 8 mm starken, in Nuten des Ankers eingelassenen Leisten aus Fiber, Stabilit oder Metall. Das letztere ist vom Eisenkern zu isolieren und nicht mehr als etwa 5 mm stark zu machen. In den Fig. 25 bis 31 sind solche Treibstützen sichtbar.

6. Vorzüge und Zweck der Ankernuten.

Die Lagerung der Ankerdrähte in Nuten wird bei neueren Konstruktionen fast ohne Ausnahme angewandt; sie hat folgende Vorzüge:

1. Der Luftspalt δ kann so klein gehalten werden, als es mit Rücksicht auf die Ankerrückwirkung oder aus mechanischen Gründen zulässig ist. Es kann daher in allen Fällen das mögliche Minimum an Magnetkupfer erreicht werden.

2. Bei gleichem Wattverluste und gleichem Kupfergewicht der Erregerspulen wie bei glatten Ankern, kann, namentlich bei kleinen Maschinen, die Luftinduktion viel größer sein. Die Abmessungen der Maschine werden dadurch bei gleicher Leistung kleiner.

3. Die Ankerdrähte werden durch die Zähne magnetisch geschirmt. Die Schirmwirkung ist um so besser, je kleiner die magnetische Sättigung der Zähne ist oder je tiefer die Drähte in den Nuten liegen. Dadurch wird es möglich, massive Drähte von erheblichem Querschnitt zu verwenden, ohne daß große Wirbelstromverluste im Ankerkupfer auftreten.

4. Eine große Sättigung der Ankerzähne vermindert die Ankerrückwirkung und wirkt ebenso wie der Luftspalt auf eine seitliche Ausbreitung des in den Anker eintretenden Kraftflusses.

5. Es wird ein sicheres mechanisches Mitnehmen der Ankerdrähte erreicht und eine vorzügliche Befestigung derselben bei großen Umfangsgeschwindigkeiten ermöglicht.

6. Die Abkühlung des Ankers bzw. die Wärmeabgabe an die umgebende Luft wird durch die Zähne, welche mit keinem Isolierstoff bedeckt sind und eine bessere Lüftung des Ankers ermöglichen, begünstigt.

Digitized by Google

7. Infolge der magnetischen Schirmwirkung der Zähne wird auf einen in einer Nut liegenden Draht nur eine kleine Tangentialkraft oder ein kleiner elektromagnetischer Zug ausgeübt, da die Induktion in den Nuten klein ist und der Kraftfluß zum größten Teile den Zähnen des Ankers folgt.

7. Nutenformen und Anordnung der Wicklung bei Nutenankern.

Es sind hauptsächlich zwei Nutenformen gebräuchlich, die offene Nut (1 bis 5, Fig. 32) und die halbgeschlossene Nut (6 und 7, Fig. 32).

Die offene, glatte Nut (1) wird aus den einzelnen Ankerblechen ausgestanzt oder in den zusammengesetzten Anker eingefräst. Die Formen 2 bis 7, welche für Keilverschluß eingerichtet sind, müssen gestanzt werden. — Die offene Nut hat den Vorzug, daß die Wicklung bequem isoliert und eingelegt werden kann. Bei Schablonenwicklungen, bei denen die isolierte Spule die ganze Nutenbreite ausfüllt, ist nur die offene Nut brauchbar.

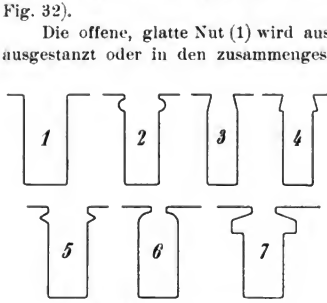


Fig. 32. Nutenformen.

Die halbgeschlossene Nut gestattet dagegen ein bequemes Befestigen der Wicklung und vermindert die Wirbelströme in massiven Ankerleitern und in den Polschuhen, so daß auch bei großen Nutweiten massive Pole verwendet werden können. Nachteilig ist die etwas größere Selbstinduktion der Ankerspulen bei dieser Nutenform. — Am meisten wird die offene Nut angewandt.

Verschiedene Anordnungen der Drähte in den Nuten sind in den Fig. 33 und 34 für Drahtwicklungen dargestellt. Die Drähte von verschiedenen Spulenseiten sind verschieden gezeichnet.

Um die gewünschte Nutenform zu erhalten, oder um den Raum einer gegebenen Nutenform gut auszunützen, ist in jedem Falle die günstigste Anordnung aufzusuchen. Da Drähte von über 3 bis 4 mm Durchmesser, namentlich bei kleinen Ankern, schwer zu wickeln sind und daher ihre Isolation leicht beschädigt wird, werden solche Drähte oft durch zwei parallele Drähte ersetzt, dadurch wird jedoch die Ausnützung des Nutenquerschnittes verschlechtert. In Fig. 33 Nr. 3 und 4 können z. B. zwei Drähte parallel geschaltet sein.

Digitized by Google

In Fig. 33 Nr. 7 und Fig. 34 Nr. 2 hat eine Spule 5 Windungen, und die Anordnung der Drähte ist etwas unsymmetrisch; es wird aber dadurch eine bessere Ausnützung des Wicklungsraumes erreicht, als bei 10 Drähten, die paarweise parallel geschaltet sind.

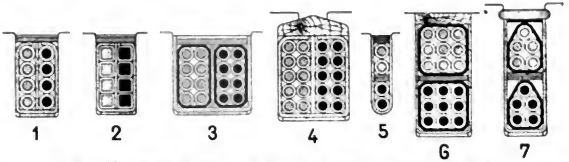


Fig. 33. Drahtwicklungen mit zwei Spulenseiten pro Nut.

Fig. 34 Nr. 4 zeigt eine Anordnung der Drähte, wie sie von Rothert[1]) angegeben wurde. Wenn die Spulen, die gemeinsam isoliert sind, auch gemeinsam gewickelt werden, sind Anordnungen wie Nr. 2 und 4 möglich.

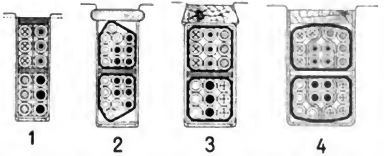


Fig. 34. Drahtwicklungen mit vier und sechs Spulenseiten pro Nut.

Wird der Querschnitt eines Ankerleiters größer als etwa 20 bis 25 mm², so geht man von der Drahtwicklung besser zur Stabwicklung über. Einige Firmen wenden die Stabwicklung schon bei einem Querschnitt von 10 mm² an.

Die Stäbe können ebenso wie die Drähte entweder alle nebeneinander oder in zwei Lagen übereinander angeordnet werden. Im ersten Falle ist die maximale Spannung zwischen zwei Spulenseiten immer nahezu gleich der Klemmenspannung, im letzteren Falle tritt diese Spannung nur zwischen den übereinander liegenden Spulenseiten auf. Die letztere Anordnung ist die gebräuchlichere.

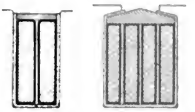


Fig. 35. Stabwicklungen mit nebeneinander liegenden Stäben.

[1]) ETZ 1901, S. 318.

Digitized by Google

Verschiedene Anordnungen der Stäbe stellen die Fig. 35 und 36 dar. In Fig. 36 Nr. 2, 3 und 5 besteht ein Leiter aus mehreren parallelen Stäben und in Fig. 36 Nr. 4 aus gepreßter

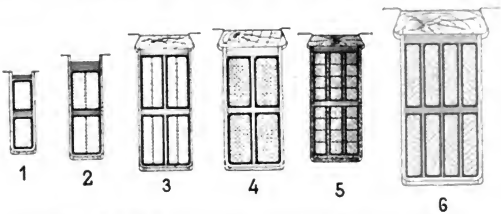


Fig. 36. Stabwicklungen mit übereinander liegenden Stäben.

Drahtlitze; beides soll die Entstehung von Wirbelströmen vermindern. Aus den auf S. 20 angegebenen Gründen ist die Teilung nach Nr. 4 und 5 die wirksamste.

8. Isolierung der Wicklung von Nutenankern.

Die Isolierung der Wicklung wird auf zwei prinzipiell verschiedene Arten ausgeführt. Entweder werden die Nuten für sich isoliert und die Ankerleiter nur besponnen oder mit Band bewickelt in die isolierten Nuten eingelegt, oder es werden die Ankerspulen oder Rahmen vor dem Einlegen in die Nuten vollständig isoliert und in nackte oder mit dünnem Preßspan bekleidete Nuten eingelegt. Die letztere Art der Isolierung ist nur bei Schablonen- oder Stabwicklungen und offenen Nuten ausführbar, sie ist aber als die beste Isoliermethode zu bezeichnen, weil die Isolation jeder Spule einzeln hergestellt und genau geprüft werden kann.

Die Stärke der Isolation muß sich nach der Klemmenspannung der Maschine richten. Man darf verlangen, daß Probestücke der Isolationsschicht im kalten Zustande etwa die fünf- bis zehnfache Klemmenspannung ohne durchzuschlagen mindestens fünf Minuten aushalten. Um dieses Resultat bei möglichst geringer Stärke der Isolation zu erreichen, ist es durchaus erforderlich, sie aus mehreren, mindestens etwa drei Lagen, zusammenzusetzen.

Als Isolierstoff für die Nuten wird hauptsächlich Preßspan, Zellulose- und Manilapapier, Leatheroid, Ölpapier, Rotpapier, Ölleinwand oder Baumwolltuch mit Leinöl oder Isolierlack getränkt verwendet; Glimmer, Mikalein und Megohmit werden für die Nutenisolation nur für höhere Spannungen, etwa von 2000 Volt ab, ver-

Digitized by Google

wendet, da man für niedrigere Spannungen mit den anderen Materialien eine genügende Isolation erreicht.

Es genügt nicht, für die Isolation einen großen Teil des Nutenraumes zu beanspruchen, um eine große Sicherheit zu erlangen, sondern man soll vielmehr durch eine richtige Auswahl der Isolierstoffe dahin streben, mit möglichst wenig Raumbeanspruchung eine ausreichende Isolierung zu erreichen.

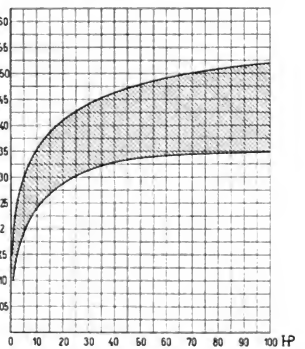


Fig. 37. Nutenfüllfaktor für Spannungen von 100 (obere Kurve) bis 600 Volt (untere Kurve).

Einen Maßstab für die Ausnützung des Nutenraumes gibt das Verhältnis des Kupferquerschnittes einer Nut zum totalen Nutenquerschnitt. Man kann dieses Verhältnis als Füllfaktor der Nut bezeichnen. Seine Größe hängt von der Spannung, Umdrehungszahl und Leistung der Maschine, bezw. von der Größe und Form des Drahtquerschnitts, der Zahl der Drähte pro Nut, der Nutenform, der Isolationsprobe, welcher die Maschine unterworfen wird, und ferner von der Geschicklichkeit, mit der die Isolierung ausgeführt wird, ab.

In Fig. 37 sind zwei Kurven nach H. M. Hobart[1]) dargestellt. Der Füllfaktor der Nuten von kleinen Motoren bis 100 PS für Spannungen von 100 bis 600 Volt liegt innerhalb der von diesen Kurven begrenzten schraffierten Fläche. Er nähert sich der unteren Grenze oder wird noch kleiner, je höher die Spannung, je größer die Zahl der Nuten ist und je weniger Geschicklichkeit und Kenntnis bei der Ausführung von Wicklung und Isolierung und der Wahl der Isolierstoffe zur Geltung kommt. Die angegebenen Grenzen können für normale Motoren eingehalten werden, sofern die Prüfspannung bei der Isolationsprobe zwischen Kupfer und Ankerkörper bei 60° C während einer Minute 2000 bzw. 3600 Volt für Maschinen mit einer Spannung von 100 bzw. 600 Volt beträgt.

Fig. 38 zeigt ebenfalls nach H. M. Hobart in anschaulicher Weise das Verhältnis zwischen Kupfer- und Nutenquerschnitt für verschiedene Annahmen.

---

[1]) Traction and Transmission.

Digitized by Google

Tabelle für die Isolierung der Wicklung von Nutenankern.

Leistung KW	Leistung PS	Touren	Volt	Nutenfüllungsfaktor	Drähte oder Stäbe pro Nut nebeneinander	Nutenweite = Kupferbreite + mm	Drähte oder Stäbe pro Nut übereinander	Nutenhöhe = Kupferhöhe + mm	Nutenform	Leiterform	Firma
—	2,6	2550	160	0,31	3	5,4 + 3,1	8	14,4 + 8,6	offen	Draht	Ver. E.-A.-G., Wien
4,5	—	850	110	0,33	2	3,6 + 2,1	8	14,4 + 7,6	„	„	Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke
15	—	1000	115	0,40	2	5 + 4	2	20 + 8	„	Stab	Comp. Gén. Electrique, Nancy
—	43,5	900	540	0,27	2	7,4 + 3,6	6	22,2 + 9,8	„	Draht	„ „ „ „
—	75	480	750—1000	0,33	2	8 + 5,6	10	22 + 17	„	Stab	Elektrizitäts-Ges. Alioth
100	—	430	220	0,45	3	5,4 + 4,6	2	24 + 5	„	„	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
150	—	500	220	0,57	3	9,6 + 3	2	26 + 9	„	„	Siemens-Schuckertwerke
175	—	450	230	0,47	2	6 + 3,5	2	26 + 9	keilverschlossen	„	Ver. E.-A.-G., Wien
250	—	125	500	0,32	6	6 + 8	2	26 + 9	offen	„	Maschinenfabrik Oerlikon
360	—	120	500	0,53	3	7,5 + 4	2	30 + 7	„	„	Ateliers de Constr. Electr. de Charleroi
400	—	125	240	0,60	3	10,8 + 4,2	2	37 + 7	„	„	Comp. Gén. Electrique, Nancy
560	—	333	160	0,40	2	6 + 6	2	34 + 8	„	„	Maschinenfabrik Oerlikon
600	—	276	560	0,48	2	5 + 3,5	2	32 + 7	„	„	„ „
900	—	100	500—600	0,43	3	7,5 + 6,1	2	28 + 8	„	„	Elektrizitätsges. Alioth
65	—	3000	115	0,36	2	5 + 3,5	2	16 + 10	keilverschlossen	„	Ges. für Elektr. Industrie, Karlsruhe i. B.
200	—	3000	250	0,34	3	12 + 9	2	36 + 24	„	„	Maschinenfabrik Oerlikon
250	—	3000	450—650	0,33	1	7 + 4,5	2	20 + 17	„	„	A.-G. Brown, Boveri & Cie.

Digitized by Google

Man sieht, daß die Ausnützung des Nutenraumes bei kleinen Motoren für hohe Spannungen (normale Tourenzahlen) sehr gering ist.

Um die Abmessungen einer Nut für eine gegebene Anzahl Kupferquerschnitte zu bestimmen, ist es am einfachsten zu berechnen, wie viel zu der Kupferbreite aller Leiter und zu der Kupferhöhe aller Leiter addiert werden muß, um die Nutenweite, bezw. die Nutenhöhe zu erhalten. Diese zu addierende Länge ist ein besseres Maß für die Stärke der Isolation als der Füllfaktor. In der vorstehenden Tabelle sind für eine Anzahl von ausgeführten Maschinen der Füllfaktor und die zu der Kupferbreite und Kupferhöhe zu addierenden Längen angegeben.

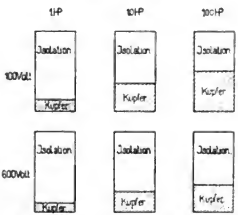


Fig. 38. Schematische Darstellung der Raumausnutzung in Nuten.

Übliche Gesamtstärken der Isolation für Stabwicklungen und verschiedene Spannungen gibt die folgende Tabelle.

Anzahl der nebeneinander liegenden Stäbe einer Nut	1	2	3	4	5
Klemmenspannung	Nutenweite = Kupferbreite plus				
Volt 125	2,0 mm	2,6 mm	3,3 mm	4,0 mm	4,7 mm
„ 250	2,4 „	3,2 „	4,0 „	4,8 „	5,6 „
„ 550	3,0 „	4,0 „	5,0 „	5,8 „	6,6 „
„ 750	3,4 „	4,4 „	5,4 „	6,2 „	7,0 „

Man wird bei ausgeführten Maschinen häufig etwas größere, aber auch kleinere Stärken der Isolation finden.

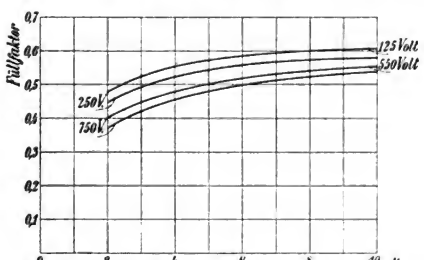


Fig. 39. Abhängigkeit des Nutenfüllungsfaktors von der Stabzahl pro Nut.

Digitized by Google

Wie eine einfache Rechnung lehrt, ist es für die Raumausnützung von Vorteil mehrere Stäbe in eine Nut zu legen. Für die gebräuchliche Anordnung mit 2 Stäben übereinander zeigen die Kurven Fig. 39 die Abhängigkeit des Füllungsfaktors von der Anzahl der Stäbe pro Nut (u_n) für verschiedene Spannungen. Diesen Kurven wurden die Isolationsstärken aus obiger Tabelle zugrunde gelegt, der Stabquerschnitt wurde gleich (3×12) mm² und die Nutenhöhe gleich $(2 \times 12) + 6 = 30$ mm angenommen.

Die Art der Isolierung ist eine sehr mannigfaltige. Von den zahlreichen Kombinationen sollen hier nur wenige Beispiele, die der Praxis entnommen sind, angeführt werden.

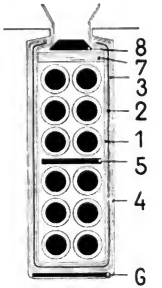


Fig. 40. Handwicklung 110 Volt.

1. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
2. Zellulosepapier = 0,06 mm.
3. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
4. Luft = 0,2 mm.
5. und 6. Leatheroid = 0,4 mm.
7. Preßspan = 1,5 mm.
8. Leatheroid oder Preßspan.

Nutenweite = Kupferbreite + 1,8 mm.

Für 220 Volt ebenso mit 0,14 mm Manilapapier anstatt 0,06 Zellulosepapier.

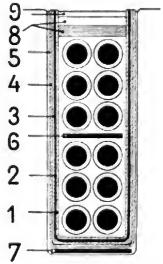


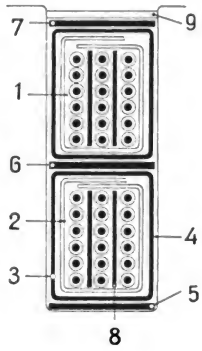
Fig. 41. Handwicklung 500—600 Volt.

1. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
2. Manilapapier = 0,14 mm.
3. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
4. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
5. Luft = 0,2 mm.
6. und 7. Leatheroid = 0,4 mm.
8. Preßspan = 0,5 und 1,0 mm.
9. Drahtband.

Nutenweite = Kupferbreite + 4,0 mm.

Digitized by Google

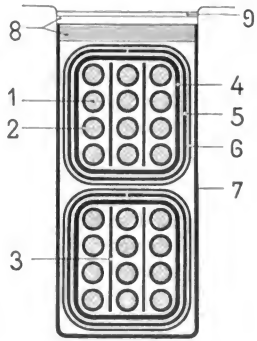
Fig. 42. Schablonenwicklung für Bahnmotor, 500 Volt.



1. Spule in Japan-A-Lack getränkt.
2. Ölbaumwolle, zweifach zu 0,21 mm.
3. Umbandlung $^1/_3$ überlappt. Band roh = 0,14 mm. Die so isolierte Spule wird mit Japan-C-Lack oder Armalack, und alsdann mit S-Lack oder Excelsiorlack getränkt.
4. Luft = 0,3 mm.
5. 6. 7. Leatheroid, lackiert = 0,4 mm.
8. Preßspan, geölt = 0,2 mm.
9. Unter dem Drahtband Leatheroid 0,35 mm einseitig lackiert. Drahtband aus verzinntem Stahldraht.

Nutenweite = Kupferbreite + 5,8 mm.

Fig. 43. Schablonenwicklung für Bahnmotor, 500 Volt, Nut 13×33 mm.



1. Draht nackt = 2,8 mm.
2. Draht isoliert = 3,1 mm (2mal besponnen).
3. Ölpapier = 0,1 mm.
4. 2mal mit Baumwollband bewickelt und mit Sterling-Lack getränkt.
5. Rahmen aus flexiblem Mikanit = 0,3 mm.
6. Baumwollband.
7. Leinwand.
8. Karton = 1,0 und 1,5 mm.
9. Drahtband = 0,6 mm.

Nutenweite = Kupferbreite + 4,6 mm.

500 V. Stabwicklung wird ebenso isoliert.

Prüfspannung kalt 5000 Volt: 1 Minute
„ warm 3000 „ 1 „

Digitized by Google

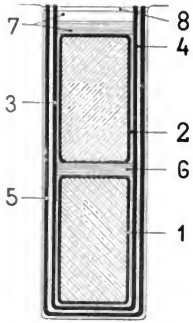


Fig. 44. Stabwicklung für 110 Volt.

1. Baumwollband und Sterling-Lack = 0,4 mm.
2. Spielraum = 0,1 mm.
3. Karton = 0,2 mm.
4. Geöltes Papier = 0,1 mm.
5. Karton = 0,2 mm.
6. Karton = 1,0 mm.
7. Karton = 1 und 1,5 mm.
8. Drahtband = 0,6 mm.

Nutenweite = Kupferbreite + 2,0 mm.

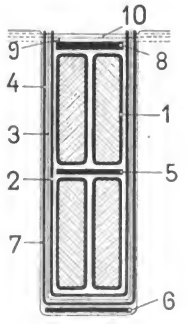


Fig. 45. Stabwicklung für 110 Volt und 220 Volt.

1. Baumwollband = 0,15 mm ($^1/_3$ überlappt und in Japan-A-Lack getränkt) = 0,4 mm.
2. Preßspan = 0,25 mm.
3. Für 110 Volt Zellulosepapier = 0,06 mm. Für 220 Volt Manilapapier = 0,15 mm.
4. Preßspan = 0,25 mm.
5. und 6. Leatheroid = 0,4 mm.
7. Luft = 0,2 mm.
8. Leatheroid je nach dem vorhandenen Platz.
9. Preßspan 1,0 mm.
10. Drahtband aus verzinntem Klaviersaitendraht.

Nutenweite = Kupferbreite + 3,3 mm.

Digitized by Google

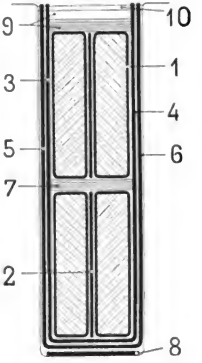


Fig. 46. Stabwicklung für 230 Volt.

1. Baumwolle mit Sterling-Lack = 0,4 mm.
2. Gewöhnliches Papier = 0,1 mm.
3. Karton = 0,3 mm.
4. Geöltes Papier = 0,1 mm.
5. Karton = 0,3 mm.
6. Spielraum = 0,20 mm.
7. Karton = 1,0 mm.
8. Karton = 0,3 mm.
9. Karton 1,0 und 1,5 mm.
10. Drahtband.

Anstatt 3, 4 und 5 können zwei Lagen Ölleinwand, eingefaßt von dünnem Baumwolltuch, mit zusammen ca. 0,6 mm Stärke gewählt werden.

Nutenweite = Kupferbreite + 3,5 mm.

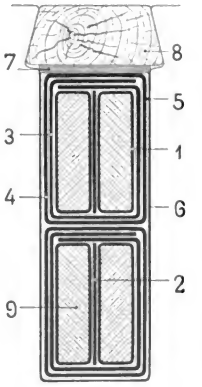


Fig. 47. Stabwicklung für 500 Volt.
(Zwei Stäbe werden gemeinsam vor dem Einlegen in die Nut isoliert.)

1. Baumwollband mit Sterling-Lack = 0,4 mm.
2. Geöltes Papier = 0,1 mm.
3. Rot-Papier = 0,2 mm und geölte Leinwand = 0,3 mm.
4. Baumwollband mit Sterling-Lack = 0,4 mm.
5. Spielraum = 0,1 mm.
6. Karton = 0,2 mm.
7. Karton = 0,5 mm.
8. Holzkeil.
9. Stab.

Nutenweite = Kupferbreite + 4,0 mm.

oder:

1. Baumwollband mit $^1/_3$ Überlappung = 0,4 mm.
2. Geöltes Papier = 0,1 mm.
3. Baumwollband mit $^1/_3$ Überlappung = 0,4 mm.
4. Zwei Lagen Ölleinwand, eingefaßt von einem dünnen Baumwolltuch, mit einer Gesamtstärke = 0,6 mm.
5. Spielraum = 0,15 mm.

Nutenweite = Kupferbreite + 4,0 mm.

In letzterem Falle ist die Bandbewicklung nicht mit Lack getränkt. Diese Tränkung erfolgt erst nach Fertigstellung der Wicklung. Der Anker wird vorher gut ausgetrocknet und dann zuerst in Japan-A-Lack oder auch gleich in Sterling-Lack getaucht und nach dem Trocknen mit einer Lösung von Kopallack bestrichen.

Digitized by Google

Die Aktiengesellschaft vorm. Joh. Jakob Rieter & Co.[1]) bettete bei einem 1500 Volt-Motor die Ankerspulen auf ihren geraden Seiten in Mikanit ein, der in Verbindung mit einem Lack in einer Stärke von ca. 1 mm stark erhitzt um die Spulenseiten gepreßt wurde. Verschiedene solcher Elemente wurden vor dem Einbau nach und nach Prüfspannungen von 7000, 8000 bis 10000 Volt während einer Stunde ausgesetzt, ohne daß bei einem derselben ein Durchschlag erfolgt wäre.

9. Lackieren, Trocknen und Verkleiden des Ankers.

Die fertig gewickelten Anker werden entweder ganz in Isolierlack getaucht, oder sie erhalten einen lufttrocknenden Isolieranstrich. Das erstere geschieht namentlich mit kleinen für höhere Spannungen gewickelten Ankern.

Es ist notwendig, den Anker vor dem Eintauchen in den Lack im Trockenofen oder im Vakuumtrockenapparat gründlich zu trocknen. Das Austrocknen hat hier nicht bloß den Zweck, die Feuchtigkeit zu entfernen, sondern es unterstützt gleichzeitig das Ansaugen von Lack. Der Anker (ohne Drahtbänder) soll so lange im Lack bleiben, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen. Es wird dazu als erster Lack vielfach dünnflüssiger Japan-A-Lack oder Armalack und als Lack zum zweiten Tränken Elektralack, Sterling-Lack oder Excelsior-Lack verwendet.

Nach jedem Tränken muß der Anker 6 bis 12 Stunden bei 80 bis 90° C getrocknet werden. Die Lacke geben der Wicklung eine große mechanische Festigkeit.

Wenn es sich nur um einen Lackanstrich handelt, ist ein vorhergehendes Trocknen nicht durchaus notwendig, obwohl es öfter geschieht. Als Anstrichlack wird lufttrocknender Japan-C-Lack, Sterling-Lack, Excelsior-Lack, Kopal-Lack und Schellack verwendet. Hinsichtlich des letzteren ist wegen Wassergehaltes Vorsicht geboten.

In manchen Fällen, z. B. bei Straßenbahnmotoren, wo die Wicklung gegen das Eindringen von Staub und Feuchtigkeit geschützt werden muß, oder wenn das Eindringen von Kupferstaub auf der Kommutatorseite verhindert werden soll, bedarf der Anker noch einer besonderen Verkleidung.

Die freien Spulenköpfe werden in diesem Falle mit Segeltuch, das in Leinöl getränkt wurde und noch einen Lackanstrich erhält, verkleidet. Am Umfange des Ankers und des Kommutators wird das Tuch durch Drahtbänder gehalten.

[1]) Elektrische Bahnen und Betriebe 1905, S. 518.

Digitized by Google

Drittes Kapitel.

Konstruktion des Ankerkörpers.

10. Ankerkern und Isolierung der Ankerbleche. — 11. Lüftung des Ankerkernes. — 12. Ankerkörper für Trommelanker. — 13. Ankerkörper für Ringanker. — 14. Befestigung des Ankers auf der Welle.

10. Ankerkern und Isolierung der Ankerbleche.

Der Ankerkern bildet einen Teil des magnetischen Stromkreises der Maschine. Um den Wattverlust durch Wirbelströme, welche bei der Drehung des Ankers im Eisenkern induziert werden, auf einen kleinen Betrag zu vermindern, wird der Kern senkrecht zur Richtung der induzierten EMK, also auch senkrecht zu den aktiven Ankerleitern, lamelliert. Durch Blechscheiben von etwa 0,5 mm Stärke wird in den meisten Fällen eine genügende Unterteilung erreicht.

Die einzelnen Blechscheiben werden durch dünne Papierscheiben voneinander isoliert oder mit einem isolierenden Anstrich (z. B. Wasserglas oder Isolierlack) versehen. Die natürliche Oxydschicht der Bleche trägt zur Isolierung ebenfalls bei.

Die Isolierung durch Papier findet heute am meisten Verwendung. Papier von 0,04 mm bis 0,06 mm kann in selbständige Scheiben geschnitten und zwischen die Eisenbleche eingelegt werden. Vorzüglich hat sich die von der Maschinenfabrik H. F. Stollberg, Offenbach a. M., gebaute Maschine zum maschinellen Bekleben der Bleche mit Papier bewährt. Die Blechtafeln werden vor dem Verarbeiten mit Papier beklebt, das eine Stärke von nur ca. 0,02 bis 0,03 mm erhalten kann.

Der Koeffizient

$$k_2 = \frac{\text{effektives Eisenvolumen des Kernes}}{\text{gesamtes Volumen des Kernes}}$$

Digitized by Google

wird bei Papierzwischenlagen von 0,04 bis 0,06 mm und 0,5 mm Blechstärke mit Berücksichtigung der Unebenheiten der Bleche

$$k_2 = 0{,}85 \text{ bis } 0{,}88,$$

dagegen bei 0,02 bis 0,03 mm Papierstärke oder einem dünnen Anstrich

$$k_2 = 0{,}9 \text{ bis } 0{,}92.$$

Die Bleche, welche den Ankerkern zu beiden Seiten abschließen, werden häufig etwas stärker gemacht, man nimmt auf jeder Seite zwei bis drei Bleche zu 0,8 mm oder ein Blech von 1 bis 2 mm oder es werden Messingbleche von 2 bis 5 mm Stärke eingelegt (siehe Fig. 60).

Ein starkes Endblech oder eine gegossene Endplatte ist bei Nutenankern namentlich dann erforderlich, wenn die Nuten gefräst werden, damit die vorstehenden Zähne den nötigen Halt bekommen.

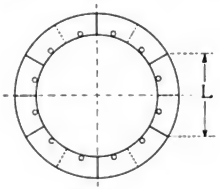


Fig. 48.

Ankerbleche bis zu 100 cm oder 110 cm Durchmesser können aus normalen Blechtafeln in einem Stück ausgeschnitten werden.

Für größere Durchmesser wird jede Scheibe aus mehreren Segmenten zusammengesetzt, wie Fig. 48 zeigt, und die Stoßfugen der aufeinander folgenden Scheiben werden gegeneinander versetzt. Bei der Feststellung der Zahl der Segmente eines Ringes ist zu berücksichtigen, daß die zu verwendenden Blechtafeln wenig Abfall ergeben und daß die Segmentzahl, wenn möglich, durch die Nutenzahl des Ankers teilbar ist.

11. Lüftung des Ankerkernes.

Um eine genügende Abkühlung des Ankers und einen guten Temperaturausgleich im Innern der Maschine zu erreichen, ist in vielen Fällen eine Lüftung des Ankerkernes erforderlich.

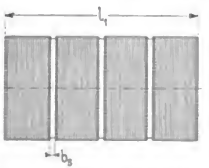


Fig. 49. Lüftung des Ankerkernes durch Luftschlitze.

Die Kernbreite l_1 (Fig. 49) wird zu dem Zwecke in einzelne Teile von 5 bis 10 cm Breite zerlegt und zwischen je zwei Teilen ein Luftschlitz von 0,8 bis 1,2 cm Breite freigelassen.

In den Fig. 50 bis 56 sind verschiedene Konstruktionen für die Herstellung von Luftschlitzen dargestellt.

Digitized by Google

In Fig. 50 ist als sog. „Luftscheibe“ ein Eisenblech verwendet, dessen Zähne um 90° verdreht und in welches nach beiden Richtungen runde Vertiefungen gedrückt sind. Fig. 51 zeigt eine ähnliche Konstruktion, hier sind aus dem Bleche kleine Stege herausgedrückt, deren Länge die Weite des Luftschlitzes bestimmt.

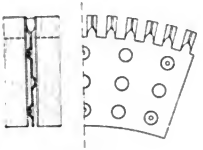


Fig. 50.

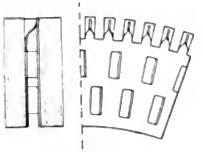


Fig. 51.

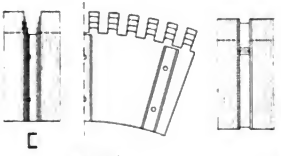


Fig. 52.

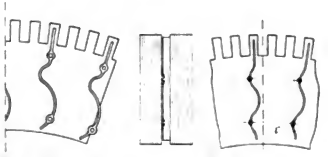


Fig. 53. Fig. 54.

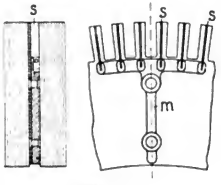


Fig. 55.

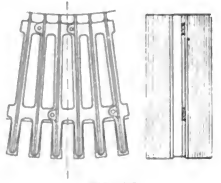


Fig. 56.

Fig. 50 bis 56. Konstruktionen für die Herstellung von Luftschlitzen im Ankerkern.

In Fig. 52 werden die Endbleche in der Nähe des Luftschlitzes treppenförmig abgestuft, um den Zähnen den erforderlichen Halt zu geben, und auf ein Endblech werden Leisten aus Eisen oder Messing oder profilierte Metallstäbe, wie die Figur zeigt, angenietet.

Ähnliche Anordnungen veranschaulichen die Fig. 53 und 54. Die Bleche zu beiden Seiten des Schlitzes sind etwas stärker gemacht und auf eines derselben gebogene Flacheisen aufgenietet.

In Fig. 55 besteht eine Luftscheibe aus einer gezahnten Blechscheibe, auf welche Segmente *m* aus Messingguß aufgenietet werden.

Digitized by Google

Die Segmente tragen am äußeren Umfang dünne, aus Eisenblech hergestellte Stege *s*, welche in die kleinen Wulste der Segmente eingegossen sind und den Zähnen des Ankers einen Halt geben. Die Luft streicht zwischen den Wulsten durch.

Eine andere Anordnung, bei der die Luftkanäle ebenfalls durch Zwischenlage von gerippten Gußstücken gebildet werden, zeigt Fig. 56.

12. Ankerkörper für Trommelanker.

Bei kleinen Trommelankern ist es zweckmäßig, die Bohrung der Ankerbleche gleich dem Durchmesser der Welle zu machen, wie in Fig. 57 dargestellt ist; bei einem gegebenen Ankerdurchmesser wird so der größte Eisenquerschnitt erreicht.

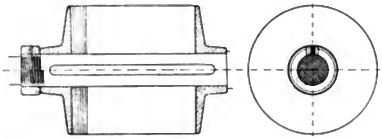


Fig. 57.

Gestattet die berechnete Höhe des Ankereisens die Bohrung der Bleche größer zu machen als den Wellendurchmesser, so erhält man zunächst eine Ankerbüchse.

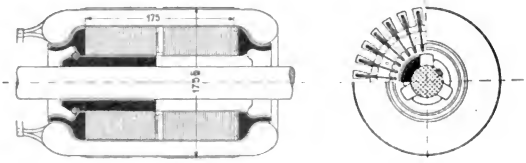


Fig. 58.

In den Fig. 58 und 59 sind zwei verschiedene Konstruktionen dargestellt.

Die Ankerbüchse, Fig. 58, hat auf der hinteren Seite drei Luftkanäle, und auf der Kommutatorseite wird die aufgepreßte gußeiserne Endplatte durch einen über die Ankerbüchse geschobenen Ring gehalten, während in Fig. 59 die Endplatte durch eine Schraubenmutter auf die Bleche gepreßt wird.

Digitized by Google

Man kann jedoch, wenn eine Ankerbüchse möglich ist, die Bleche doch bis zur Welle gehen lassen und den Anker nach der in Fig. 60 dargestellten Art lüften.

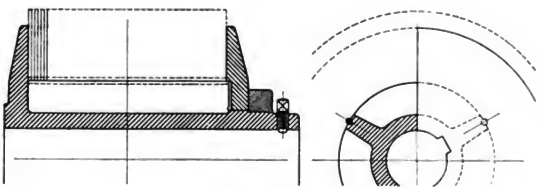


Fig. 59.

Eine Konstruktion des Ankerkörpers, wie sie in ähnlicher Form oft ausgeführt wird, zeigt die Fig. 61. Die Ankerbüchse hat

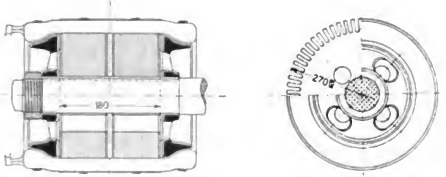


Fig. 60.

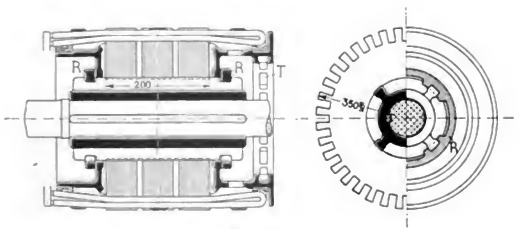


Fig. 61.

vier Rippen und die Kopfplatten werden mittelst Bajonettverschlusses durch zwei Ringe R gehalten. Der Ring R ist in der Seitenansicht schraffiert; beim Einlegen ist er um 45^0 gegen die jetzige Lage

Digitized by Google

verdreht, so daß er über die Rippen der Büchse geschoben werden kann. Die hintere Kopfplatte hat Bleitaschen T zum Ausbalancieren des Ankers.

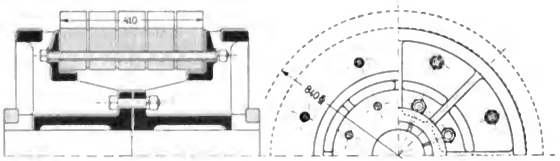


Fig. 62. Siemens & Halske A.-G., Wien.

Zwei Ankerkonstruktionen, die ebenso wie die vorhergehenden, eine gute Lüftung besitzen, veranschaulichen die Fig. 62 und 63. Die Kopfplatten werden durch Bolzen, welche die Ankerbleche durchdringen, zusammengepreßt.

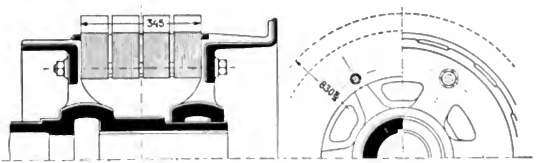


Fig. 63.

Für größere Anker, bei denen der Kern aus einzelnen Blechsegmenten zusammengesetzt ist, ist es erforderlich, den Kern in radialer Richtung fest mit dem Ankersterne zu verbinden, sonst ist ein Loswerden des Kernes während des Betriebes zu befürchten.

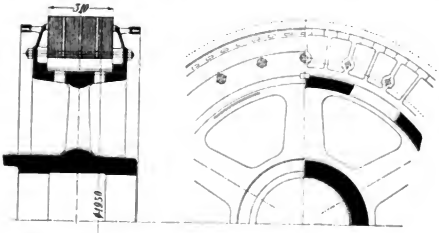


Fig. 64. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B.

Digitized by Google

In Fig. 64 und 65 sind Konstruktionen dargestellt, welche dieser Anforderung entsprechen. Die einzelnen Blechsegmente werden durch die Schrauben sowohl zusammengepreßt, als auch fest mit dem Ankersterne verbunden. Die Zahl der Schrauben muß so groß sein, daß jedes Segment mindestens durch zwei Schrauben gehalten wird.

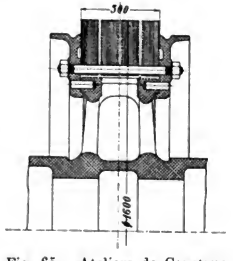


Fig. 65. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

Der Ankerkern mit den beiden Kopfplatten bilden bei beiden Konstruktionen einen Teil für sich. In Fig. 64 geschieht die Befestigung dieses Teiles mit dem Armsystem mittelst Keile, während in Fig. 65 hierzu Stifte angewendet werden.

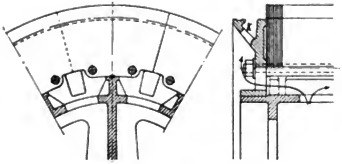


Fig. 66.

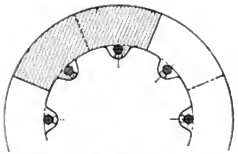


Fig. 67. Wood, Cleveland.

Zweckmäßig ist es, die Bolzen nach einer vom Verfasser für eine Maschine von 800 KW ausgeführten Art, die in Fig. 66 dar-

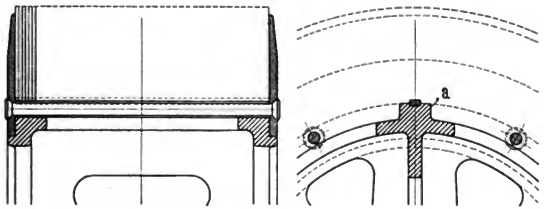


Fig. 68. E.-G. Alioth.

gestellt ist, anzuordnen. Die Ankerbleche sind so ausgestanzt, daß die Bolzen ganz außerhalb des magnetischen Kraftflusses liegen. Die Aussparungen des Bleches, welche mit seitlichen Öffnungen im

Digitized by Google

Ankerstern in Verbindung stehen, ermöglichen außerdem eine vorzügliche Kühlung.

Fig. 67 zeigt eine Befestigungsart der Bleche nach der Methode von Wood, Cleveland.

Die in den Fig. 61 bis 66 dargestellten Ankerkörper sind für Mantelwicklungen bestimmt. Zwei Anker für Stirnwicklungen, der eine für einen kleinen, der andere für einen großen Durchmesser, sind in den Fig. 68 und 69 gezeichnet.

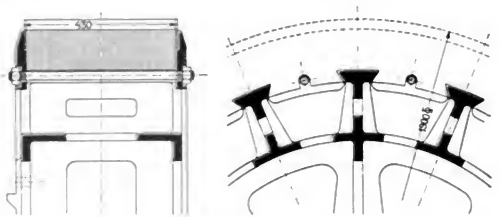


Fig. 69. E.-G. Alioth.

Mehrere andere Konstruktionen von Trommelankern findet man bei den verschiedenen Maschinenbeispielen.

13. Ankerkörper für Ringanker.

Bei den bis jetzt angeführten Konstruktionen ist angenommen worden, daß der Ankerstern aus Gußeisen besteht; für Trommelanker ist das zulässig, aber nicht für Ringanker.

Bei Ringankerwicklung erzeugen die Ankerdrähte im Innern des Ringes ein stehendes magnetisches Feld, dessen Stellung nur von der Lage der Bürsten abhängt. Um die Intensität dieses Feldes und damit den Verlust durch Wirbelströme, welche bei der Rotation des Ankersternes in diesem magnetischen Felde entstehen, zu vermindern, muß der Ankerstern aus einem nicht magnetischen Metalle, am besten aus Bronze oder Messingguß hergestellt werden.

Da Ringanker nur noch vereinzelt gebaut werden, wollen wir auf die verschiedenen Konstruktionen nicht weiter eingehen.

Digitized by Google

14. Befestigung des Ankers auf der Welle.

Der Anker ist auf der Welle sowohl gegen Verdrehung wie gegen Verschiebung zu sichern. Die Sicherung gegen Drehung geschieht wie bei Riemenscheiben durch Flach- oder Tangentialkeile.

Die Sicherung gegen Verschiebung muß insbesondere bei Ankern, die mit der Welle transportiert werden, eine sehr gute sein. Bei den im zehnten Kapitel abgebildeten Ankerkonstruktionen sind verschiedene Befestigungsarten zu finden. Kleine Anker werden häufig zwischen einen Wellenbund und einen Schrumpfring oder eine Schraubenmutter (Fig. 57 und 60) eingeklemmt. Das Schraubengewinde verteuert die Welle und wird daher gerne vermieden.

Große Anker werden meistens mittelst Schrumpfringe auf der Nabe um die Welle festgeklemmt.

Digitized by Google

Viertes Kapitel.

Konstruktion des Kommutators.

15. Allgemeines über die Konstruktion des Kommutators. — 16. Material und Gestalt der Lamellen. — 17. Isolierung des Kommutators. — 18. Beispiele von Kommutatorkonstruktionen.

15. Allgemeines über die Konstruktion des Kommutators.

Der Kommutator ist einer beständigen und unter ungünstigen Verhältnissen einer raschen Abnutzung unterworfen; unter günstigen Betriebsverhältnissen, d. h. bei funkenfreiem Gange und richtiger Wahl des Materials der Lamellen und der Bürsten wird er jedoch viele Jahre halten.

Das funkenfreie Arbeiten eines Kommutators hängt im wesentlichen von der Konstruktion der Dynamo ab, aber die Konstruktion des Kommutators selbst ist ebenfalls von Bedeutung. Hierbei kommen besonders das Material der Lamellen, die Isolierung der einzelnen Lamellen gegeneinander, die Isolierung des ganzen Kommutators gegen die Büchse und die Lüftung in Betracht.[1])

Der Kommutator soll aus bestem Material und mechanisch so hergestellt werden, daß er ein festes unveränderliches Gefüge behält, die Lamellen sind zu diesem Zweck unter großem Druck zusammenzuspannen.

16. Material und Gestalt der Lamellen.

Die Lamellen werden heute fast allgemein aus gezogenem, hartem Profilkupfer ausgesägt, ausgestanzt oder aus Kupferbarren in Gesenken geschmiedet. In allen Fällen muß das Material sehr homogen sein und die Lamellen eines Kommutators müssen gleiche Härte haben.

[1]) Siehe ETZ 1907, S. 263. Die Übergangsspannung von Kohlenbürsten in Abhängigkeit von der Temperatur, von E. Arnold und E. Pfiffner.

Digitized by Google

Verschiedene Formen der Lamellen sind aus den folgenden Figuren ersichtlich. Der Winkel α (Fig. 70), unter welchem die Büchse die Lamellen faßt, soll 30^0 oder 45^0 betragen.

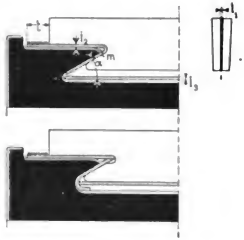


Fig. 70.

Die Stärke der Lamellen richtet sich nach der Stärke der Armaturleiter und dem Durchmesser des Kommutators. Wenn möglich geht man nicht unter eine Stärke von 5 bis 7 mm; als noch ausführbar kann eine Stärke von 3 bis 3,5 mm angesehen werden. — Sehr breite Lamellen, wie sie bei Elektrolytmaschinen mit großen Stromstärken und kleinen Spannungen vorkommen, kann man, um die Wirbelstromverluste (S. 669, Bd. I) zu vermindern, aus zwei oder mehr parallelen Lamellen herstellen; ein Ankerdraht ist dann an zwei bezw. mehr Lamellen anzuschließen.

17. Isolierung des Kommutators.

Für die seitliche Isolation i_1 (Fig. 70) der Lamellen wird fast ausschließlich weicher Glimmer verwendet, und zwar entweder Naturglimmer oder bei größeren Längen das billigere Mikanit oder Megohmit. (Siehe S. 8.)

Glimmer besitzt eine sehr hohe Isolierfestigkeit, ist nicht hygroskopisch und Kommutatoren mit Glimmerisolation können, ohne daß die Isolation geschädigt wird, im Betriebe von Zeit zu Zeit leicht geschmiert werden, was zur Schonung des Kommutators beiträgt.

Von großer Wichtigkeit ist, daß der Glimmer metallrein und so weich ist, daß er sich mit den Lamellen gleichmäßig abnutzt.

Besondere Sorgfalt ist der Isolierung der Lamellen gegen das Gehäuse zu widmen, denn hier kommt die volle Spannung der Maschine in Betracht. Die Isolation i_2 der Enden der Lamellen wird aus Papier, Preßspan mit und ohne Glimmereinlage und bei Trambahnmotoren und höheren Spannungen aus Mikanit und Megohmit hergestellt. Diese Endisolationen, sog. Kommutatorringe, können von den Fabrikanten in einem Stück bezogen werden.

Die Isolation i_3 am innern Umfange ist nur dann erforderlich, wenn der Luftabstand der Lamellen vom Gehäuse keine genügende Isolierung bietet, oder wenn das Gehäuse durchbrochen ist, um die

Digitized by Google

inneren Flächen vor Staub zu schützen. — Die Isolation soll, insbesondere bei Hochspannungsmaschinen, um eine genügende Strecke t über die Lamellen vorstehen. Zum Festhalten derselben dient ein Schnurband.

Die Stärke der Isolation kann nach der folgenden Tabelle bemessen werden.

Für Spannungen	i_1 Glimmer mm	i_2 Glimmer mm	i_2 und i_3 Papier mm
bis 250 Volt	0,5 bis 0,8	1 bis 3	2 bis 4
„ 1000 „	0,8 „ 1,0	3 „ 5	4 „ 6

Bei großen Kommutatoren wird wegen der mechanischen Festigkeit i_2 größer gewählt, als bei kleinen.

18. Beispiele von Kommutatorkonstruktionen.

In den Fig. 71 bis 83 sind 13 verschiedene Konstruktionen dargestellt, welche ausgeführten Maschinen entnommen sind.

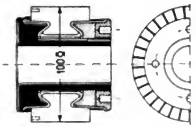


Fig. 71.

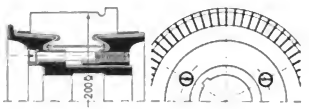


Fig. 72.

In der Fig. 71 ist zum Festschrauben der Lamellen eine einzige schmiedeeiserne Mutter angeordnet. Bei den übrigen Konstruktionen werden die Schlußringe oder Segmente mittels Schrauben angepreßt. Die Schlußringe besitzen in allen Fällen eine gute Führung.

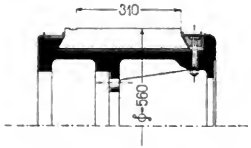


Fig. 73.

In Fig. 73 und 74 ist der Preßring in mehrere Teile zerlegt, die mittels Schrauben auf die Lamellen gepreßt werden. Diese Konstruktion gewährt den Vorteil, daß eine gleich gute Befestigung am ganzen Umfange erreicht und ein Auswechseln einzelner, fehlerhafter Lamellen nachträglich möglich ist.

Digitized by Google

In Fig. 75 bestehen beide Preßringe aus Segmenten. Die Lamellen werden hier direkt durch den radialen Druck der einzelnen Stücke zusammengepreßt.

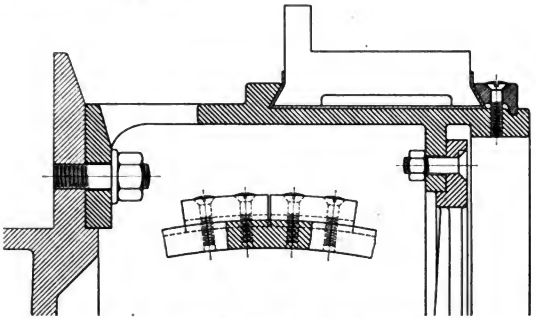


Fig. 74. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

An den Kommutatoren Fig. 76 bis 78 ist bemerkenswert, daß bei der Formgebung des Gehäuses auf eine gute Luftkühlung Bedacht genommen ist.

Zwei Schlußringe haben die Kommutatoren Fig. 78 und 79, welche entweder gemeinsam oder einzeln festgezogen werden.

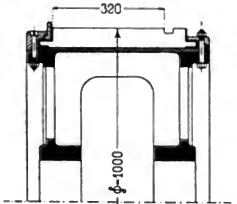


Fig. 75.

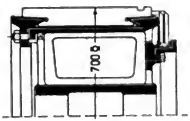


Fig. 76.

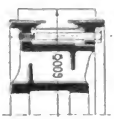


Fig. 77.

Fig. 80 gibt den Schnitt durch den Kommutator eines Straßenbahnmotors. Auf der Stirnseite ist ein Stabilitring aufgesetzt, um eine gute Oberflächenisolierung zu erreichen.

Bei langen Lamellen ist eine besonders gute Befestigung erforderlich. In Fig. 81 ist das erreicht, indem die Lamellen in der

Digitized by Google

Mitte durch zwei konische Preßplatten gehalten werden und an den Enden außerdem durch schmiedeeiserne Segmente befestigt sind.

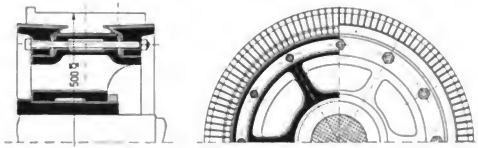


Fig. 78.

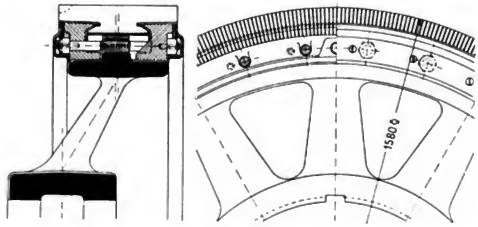


Fig. 79.

Die Kommutatoren der Turbogeneratoren erfordern besondere Konstruktionen. Ihre Durchmesser sind im Verhältnis zum Wellendurchmesser im allgemeinen so klein, daß eine richtige Nabe nicht

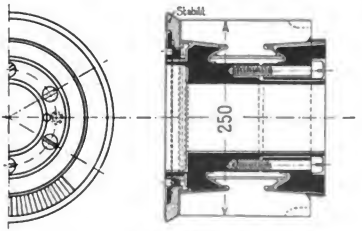


Fig. 80.

ausgeführt werden kann. Ferner sind sie meistens lang und erfordern besondere Anordnungen, um die Fliehkraft unschädlich zu machen. Die Konstruktionen der verschiedenen Firmen zeigen viel

Digitized by Google

Ähnlichkeit in der Lösung dieser Aufgabe. Die Kommutatoren werden je nach ihrer Länge mit 2 bis 4 nahtlos geschmiedeten Schrumpfringen versehen und innen mittels konischer Stücke auf der Welle gehalten.

Verschiedene derartige Konstruktionen zeigen die Maschinenbeispiele.

Fig. 82 zeigt einen künstlich gekühlten Kommutator eines Turbogenerators. Diese Anordnung wurde von C. M. Toplis und der Firma Siemens Brothers angegeben.[1])

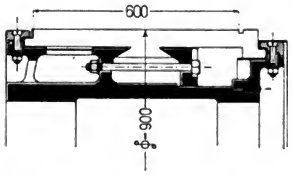


Fig. 81. Maschinenfabrik Oerlikon.

Eine künstliche Kühlung hat den doppelten Vorteil, daß erstens der Kommutator kürzer gehalten werden kann, und daß zweitens die Kommutation sich bedeutend besser gestaltet (siehe S. 46).

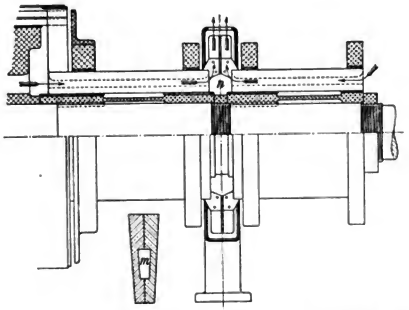


Fig. 82. Künstlich gekühlter Kommutator von Siemens Brothers.

Jede Lamelle enthält einen Luftkanal *m*. Die Lamellen sind von der auf die Welle aufgezogenen Manschette durch Glimmerringe isoliert; sie werden durch Stahlringe unter Zwischenlegung von Isolierringen zusammengehalten. Die Lamellen bestehen aus zwei einander gegenüberstehenden Teilen, zwischen welchen ein Luftraum *n* freibleibt; an diesem Ende ist an jede Lamelle eine Schaufel

[1]) Z. f. E. 1906, S. 935.

Digitized by Google

angebracht und die gegenüberstehenden Schaufeln sind durch weiche Kupferbänder verbunden. Um die Schaufeln herum ist ein Gehäuse mit Öffnungen feststehend angeordnet. Bei der Rotation wirken die Schaufeln wie ein Ventilator, die Luft wird axial von außen durch die Kanäle in den Lamellen angesaugt und radial durch die Löcher im Gehäuse ausgeblasen. —

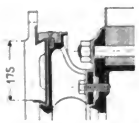


Fig. 83. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

Andere Lüftungsarten des Kommutators sind bei den Turbogeneratoren angegeben.

Die Fig. 83 veranschaulicht einen sogen. Stirnkommutator, dessen Ebene senkrecht zur Wellenachse steht. Der Preßring besteht, wie in Fig. 74, aus mehreren Segmenten.

Digitized by Google

Fünftes Kapitel.

19. Bürsten und Bürstenhalter. — 20. Bürstenträger und Stromableitungen.

19. Bürsten und Bürstenhalter.

Kohlenbürsten. Die Kohlenbürsten werden in verschiedener Härte und mit verschiedenem Graphitgehalt in jeder beliebigen Form hergestellt, einige Formen derselben enthalten die in den Fig. 88 bis 100 dargestellten Bürstenhalter.

Um einen guten Kontakt zwischen der Kohle und dem Bürstenhalter zu bekommen, wird die Kohle galvanisch verkupfert, versilbert oder vernickelt, oder mit einem Metallschuh oder einem in die Kohle eingelassenen Metallstift versehen.

Damit die Kohle sich rasch in die richtige Form einschleift, wendet man für einen Bürstensatz je nach der Stromstärke mehrere Kohlen von kleineren Abmessungen an. Die Breite der Kohle richtet sich nach der Zahl der zu bedeckenden Lamellen und beträgt 5 bis 30 mm und mehr, die Länge meistens 20 bis 30 mm und höchstens etwa 50 mm, so daß die Kontaktfläche einer Kohle im allgemeinen nicht mehr als 6 bis 9 cm^2 erreicht.

Bei den gewöhnlichen Kohlenbürsten wird die Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit erst durch einen Glühprozeß erhalten. Anders ist dies bei den Morganite-Bürsten. Diese werden hergestellt indem eine aus Graphit und einer Gelatinelösung bestehende Masse unter hohem Druck gepreßt wird. Die Leitfähigkeit ist quer über die Bürsten bedeutend kleiner als senkrecht darauf.

Metallbürsten. Die Metallbürsten lassen eine 4 bis 5 mal größere Stromdichte als die Kohlenbürsten zu und haben dabei eine 30 bis 50 mal kleinere Übergangsspannung. Deswegen kommen sie da in Frage, wo durch Kohlenbürsten Verluste entstehen würden, welche nur bei abnormal großen Abmessungen des Kommutators abzuführen wären. Ihr Anwendungsgebiet beschränkt sich hiernach fast ausschließlich auf Maschinen mit geringer Spannung und raschlaufende Maschinen. Bei Maschinen für sehr kleine

Digitized by Google

Spannungen und Selbsterregung ist man auch deshalb auf Metallbürsten angewiesen, weil bei Kohlenbürsten der Spannungsabfall unter den Bürsten im Verhältnis zur Spannung so groß werden kann, daß die Maschine sich nicht selbst erregt.

Die Metallbürsten werden aus Kupfer- oder Messingblättern und aus Kupfer- oder Messinggewebe hergestellt. Die Bürsten Patent Boudreaux bestehen aus dünn gewalzten Metallblättchen von 0,02 bis 0,03 mm Dicke, welche gefaltet und unter hohem Druck zusammengepreßt werden. Das dazu verwendete Metall, welches im wesentlichen aus Kupfer besteht, ist sehr biegsam und schont den Kommutator mehr als Bürsten aus hart gewalztem Messingblech.

Die Metallbürste Endruweit ist aus galvanisch niedergeschlagenen Metallblättern hergestellt, zwischen welchen sich eine präparierte Kohlenmasse befindet.

Die verschiedenen Herstellungsarten und Zusammensetzungen der Gewebebürsten, die im Handel angepriesen werden, sind zahlreich. Meistens wird chemisch reines Kupfergewebe zu einer Bürste gefaltet und gepreßt; es kommen jedoch auch Kupferlegierungen und Messinggewebe, sowie Kupfergewebe mit Graphiteinlage zur Verwendung.

Der Querschnitt der Metallbürsten ist immer rechteckig, die Breite beträgt im allgemeinen 3 bis 10 mm und die Länge 20 bis 50 mm.

Metall-Kohlenbürsten. In dieser neuerdings vielfach angewandten Gattung sucht man die große Leitfähigkeit der Metallbürsten mit den Vorteilen der Kohlenbürsten, die den Kommutator weniger angreifen und die zusätzlichen Kurzschlußströme durch einen höheren Übergangswiderstand herabdrücken, zu verbinden. Verschiedene Arten dieser Bürsten: Endruweit, Ringsdorff und Bronskol wurden eingehend im Band I, S. 338 beschrieben.

Bürstenhalter. Der Bürstenhalter ist ein sehr wichtiger Konstruktionsteil der Dynamomaschine. Die hauptsächlichsten Bedingungen, die ein guter Bürstenhalter erfüllen soll, sind folgende:

1. Für die Ableitung des Stromes zum Bürstenstift muß ein guter Kontakt vorhanden sein.
2. Der Auflagedruck muß leicht und gut regulierbar sein.
3. Die Bürste muß nachstellbar sein, oder sie darf durch die Abnutzung ihre Stellung zum Kommutator nur wenig oder gar nicht verändern.
4. Der Bürstenhalter soll bei Erschütterungen der Maschine nicht in Vibration gelangen.

Digitized by Google

5. Die Bürsten und der Bürstenhalter müssen leicht auf- und abmontiert werden können.
6. Der Bürstenhalter muß möglichst geräuschlos arbeiten.

Als weitere Bedingungen, die in gewissen Fällen hinzukommen und zweckmäßig sind, können noch genannt werden:

7. Es soll jede Bürste einzeln vom Kommutator abgehoben werden können.
8. Es soll jede Bürste für sich auf dem Kommutator etwas verstellt werden können.
9. Bei Bürstenhaltern mit beweglichen Kohlen ist darauf zu achten, daß die Kohle durch die Hülse des Halters eine ruhige und sichere Führung erhält.

Von den zahlreichen Konstruktionen sollen hier nur einige typische Beispiele angeführt werden.

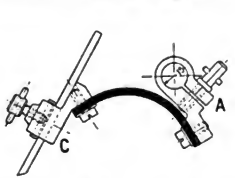


Fig. 84.

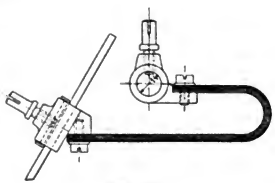


Fig. 85.

Fig. 84 bis 86 stellen Bürstenhalter für Metallbürsten dar. Bei den Konstruktionen Fig. 84 und 85 ist das Klemmstück durch eine aus mehreren Lagen dünnem, hart gewalztem Messing-

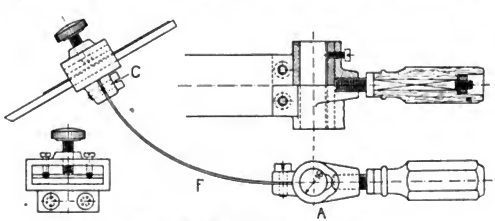


Fig. 86. E.-G. Alioth, Basel.

blech bestehende Feder direkt mit der Hülse, welche die Bürste trägt, verbunden.

Digitized by Google

In Fig. 86 ist eine Feder aus Stahl- oder hartem Kupferblech angewandt.

Für Turbogeneratoren muß der Metallbürstenhalter in allen Teilen mit besonderer Sorgfalt durchgebildet werden.

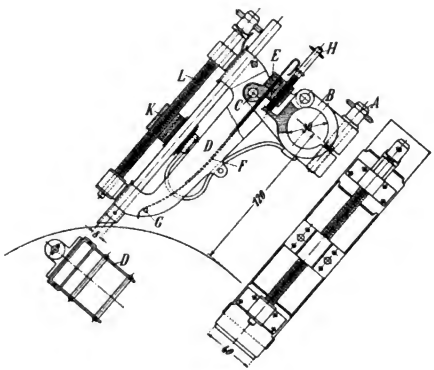


Fig. 87a.

Fig. 87a zeigt ein Beispiel eines solchen Bürstenhalters. Die Klemmbüchse wird mittelst der Schraube *A* auf dem Stift festgeklemmt. Der Teil *B* der Klemmbüchse ist in einem Scharnier drehbar und kann aufgeklappt werden, so daß der Halter leicht auf den Stift montiert werden kann, wenn der Stift auf beiden Seiten vom Bürstenträger gefaßt wird. Um den Stift *C* sind unabhängig voneinander gelagert: die Wangbleche *D*, die Klemmbüchse und das Stück *E*, welches die Feder *F* trägt. Die Feder *F* legt sich gegen einen Stift *G* und preßt so die Bürste an. Der Druck der Feder kann mittelst der Schraube *H* geregelt werden. Um eine genaue Einstellung der Bürste zu ermöglichen, ist sie in einem Stück *K* gefaßt, welches sich durch Drehung der Schraube *L* verschieben läßt. Da sich bei großen Kommutatorgeschwindigkeiten die Bürsten schnell abnützen, ist ein leicht und genau vorzunehmendes Nachstellen erforderlich. Namentlich die negativen Bürsten zeigen, wahrscheinlich infolge der Wanderung der Metalljonen in der Richtung des Stromes, eine rasche Abnützung.

Digitized by Google

Ein weiteres Beispiel gibt Fig. 87b. Der Knopf zum Nachstellen der Bürste ist isoliert, so daß auch während des Betriebes ein Einstellen der Bürsten möglich ist. Der Halter ist von einer Schutzkappe aus Isolierstoff überdeckt.

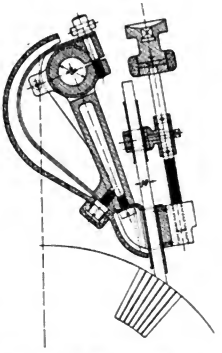


Fig. 87b. Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Bürstenhalter für Kohlenbürsten können wir einteilen in:

1. diejenigen, bei welchen die Kohle in einem Teil des Halters befestigt und mit diesem beweglich ist;
2. diejenigen, bei welchen die Kohle ganz für sich beweglich ist und der Halter nur als Führung dient;
3. die Reaktionsbürstenhalter.

Zur ersten Gattung gehören die Bürstenhalter nach Fig. 88 bis 92.

Fig. 88 zeigt einen Bürstenhalter der Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf.

Die seitlichen Teile *C* bestehen aus galvanisiertem, gestanztem Eisenblech, die Kohle wird dazwischen geklemmt. Die Stromableitung muß durch ein Kupferblech *D* unterstützt werden.

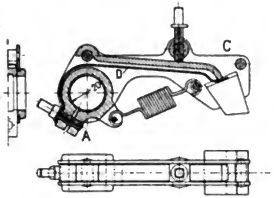


Fig. 88. Comp. de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf.

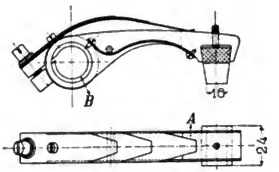


Fig. 89. Gesellschaft für Elektr. Industrie, Karlsruhe i. B.

In Fig. 89 ist ein Bürstenhalter der Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. dargestellt.

Die Kohle wird von einem Messingklotz *A* gefaßt und hierin mittelst einer Schraube festgepreßt. Der Klotz ist beiderseits durch

Digitized by Google

Messingbleche mit der Büchse B, welche sich um den Bürstenstift legt, verbunden. Die Bürste wird durch eine Blattfeder aus Messingblech angepreßt. Um eine sichere Stromabfuhr zu erhalten, ist die Büchse B mittelst eines Kabels an den Klotz A angeschlossen. Der obere Teil der Bürste ist verkupfert.

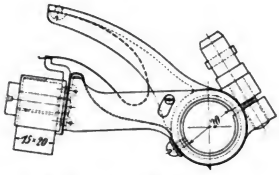


Fig. 90. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

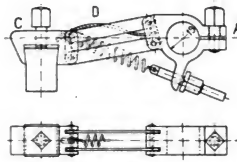


Fig. 91. Bergmann Elektrizitäts-Werke, Berlin.

Fig. 90 zeigt eine Konstruktion der Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke, Frankfurt a. M.

Das Besondere dieses Bürstenhalters ist die Anordnung der Feder. Diese ist so gelagert, daß bei einer großen Länge der Feder und dadurch erzielter gleichmäßiger Anpressung ein kleiner Abstand von der Bürste bis zum Drehpunkt erhalten wird. Hierdurch wird die Stabilität gefördert und die Abmessungen der beweglichen Teile fallen kleiner aus.

Bei den erwähnten Haltern ändert die Bürste etwas ihre Lage zum Kommutator infolge ihrer Abnutzung.

Bergmann & Co. vermeiden das durch Anordnung einer Parallelführung, wie Fig. 91 darstellt.

Fig. 92. Western Electric Company.

Eine ähnliche Anordnung zeigt Fig. 92. Die Parallelführung wird hier durch zwei Federn gebildet, welche auch den Strom führen. Zur Erzielung des erforderlichen Anpressungsdruckes der Kohle ist noch eine dritte Feder da, deren Spannung geregelt werden kann. Die Kohle ist einfach gegen den Halter geschraubt.

Zur zweiten Gattung gehören die Fig. 93 bis 97.

Die Konstruktion Fig. 93 ist von den Ateliers de Construc-

Digitized by Google

tions Electriques de Charleroi. Die bewegliche Kohle wird durch einen Metallschuh gefaßt und leitend mit dem Klemmstück

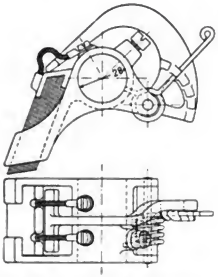


Fig. 93. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

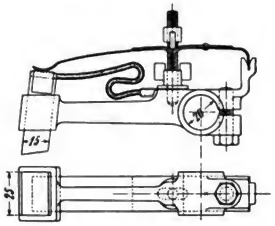


Fig. 94. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co.,

verbunden. Der Hebel, welcher sich auf die Kohle legt, wird mittelst einer Spiralfeder auf die Kohle gepreßt. Der Federdruck kann dadurch reguliert werden, daß das Federende in verschiedene Einschnitte des Hebels eingelegt wird.

Fig. 94 zeigt eine Ausführung der Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Die Konstruktion ist aus der Zeichnung leicht zu erkennen. Der Halter besteht aus Rotguß.

Einen ähnlichen Bürstenhalter zeigt Fig. 95.

Die große Blattfeder ermöglicht eine sehr feine Regulierung des Bürstendruckes.

Fig. 96 veranschaulicht einen Halter der Siemens-Schuckertwerke. Es sind hier zwei Kohlen in einem Halter angeordnet. Die vordere Bürste ist in der Betriebsstellung gezeichnet, während

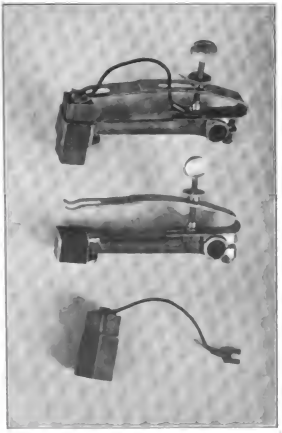


Fig. 95.

Digitized by Google

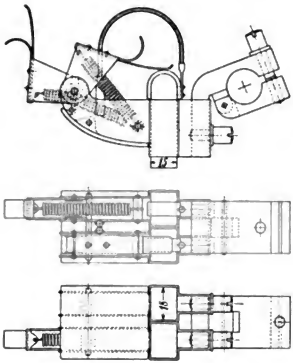


Fig. 96. Siemens-Schuckertwerke.

bei der hinteren der Hebelarm zur Entfernung der Kohle aufgeklappt ist. Die Auswechselung der Kohle ist, wie hieraus ersichtlich, in einfacher Weise möglich.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut einen Halter nach Fig. 97. Es sind hier drei Kohlen direkt nebeneinander in einem Halter gelagert. Sie werden durch je eine Blattspiralfeder angepreßt. Die Federn sind in Muttern befestigt, welche drehbar um den Bolzen *a* gelagert sind. Der Stift *b* ist in diesem Bolzen fest und kann durch Drehung und Verschiebung der Mutter in verschiedene Einschnitte der Mutter gelegt werden, wodurch die Spannung der Feder reguliert wird.

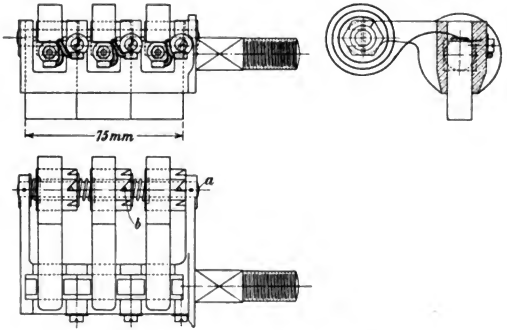


Fig. 97. Maschinenfabrik Oerlikon.

Zur Gattung der Reaktionsbürstenhalter gehören die Bürstenhalter nach Fig. 98 und 99. Diese Bürsten werden nur auf

einer Seite geführt. Sie werden gegen diese Seite gepreßt mittelst eines Hebels, der durch eine Feder gespannt wird. Die Kohlen müssen an der Fläche, wo sie sich gegen den Halter legen, schwer verkupfert sein. Der obere Winkel der Bürste soll 45^0, der untere 60^0 sein. Der Abstand der Halter bis zum Kommutator (in Fig. 98*C*) soll möglichst klein sein. Die Drehung des Kommutators kann nach beiden Seiten erfolgen, jedoch bewährt sich die eingezeichnete Drehrichtung am besten.

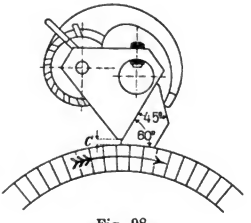


Fig. 98.

Fig. 99 zeigt eine Ausführung eines Reaktionsbürstenhalters der Ganz'schen Electricitäts Actien-Gesellschaft. Konstruktion und Wirkungsweise sind aus der Zeichnung leicht zu erkennen.

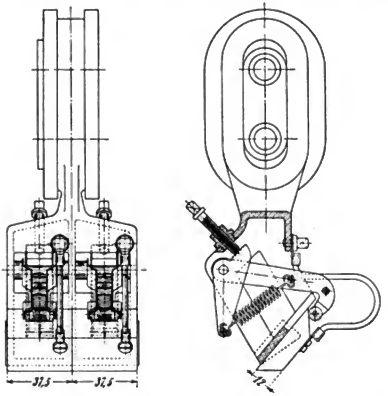


Fig. 99. Ganz'sche Electricitäts Actien-Gesellschaft.

Eine kombinierte Bürste ist in Fig. 100 abgebildet. Die Kohle *K* bildet die ablaufende Bürstenspitze und sitzt unmittelbar hinter der Kupfergewebebürste. Der Kohlenhalter ist so konstruiert, daß er an jedem Kupferbürstenhalter gleicher Breite ohne weiteres

Digitized by Google

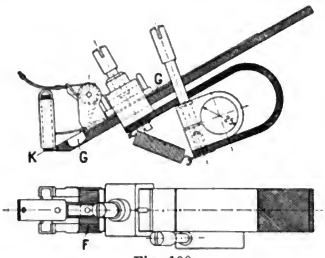


Fig. 100.

angebracht werden kann. Der ganze Halter ist auf einem Blech *G* befestigt, welches an Stelle des Beilageblechs zu der Kupferbürste in den Kupferbürstenhalter eingeschoben und hier festgespannt wird. Um der Kohle besseren Halt zu geben, ist das Blech seitlich um die Kupferbürste umgebogen. Die Kohle selbst wird mittelst der Spiralfeder *F* auf den Kommutator gepreßt.

20. Bürstenträger und Stromableitungen.

Bei allen Motoren mit veränderlicher Drehrichtung, also insbesondere bei Straßenbahnmotoren, werden die Bürsten in fester Stellung und zwar in der geometrisch neutralen Zone angebracht. Haben wir dagegen nur eine Drehrichtung, so ist es namentlich bei größeren Maschinen zweckmäßig, die Bürsten verstellbar anzuordnen, damit sowohl hinsichtlich der Funkenbildung als der Übergangsverluste die günstigste Bürstenstellung aufgesucht werden kann, die sich zwar annähernd, aber nicht mit erwünschter Genauigkeit und Leichtigkeit vorausberechnen läßt.

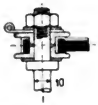


Fig. 101.

Fig. 102.

Fig. 103.

In den meisten Fällen wird gefordert, daß die Bürsten in der einmal eingestellten Lage für alle Belastungen ohne schädliche Funkenbildung bleiben können.

Die Bürstenstifte sind mit dem eigentlichen Bürstenträger isoliert verbunden. Einige Arten dieser Isolierung sind in den Fig. 101 bis 103 dargestellt. Bei höheren Spannungen ist auf eine gute Oberflächenisolierung Bedacht zu nehmen, indem man die Isolierscheiben über dem gußeisernen Träger hervorstehen und die Isolierhülsen wie in Fig. 102 und 103 einander übergreifen läßt. Die Stärke der Isolierhülsen und Scheiben beträgt 5 bis 15 mm.

Digitized by Google

Als Isolierstoff wird gepreßtes Papier, Holz, Fiber, Stabilit, Megohmit usw. verwendet. —

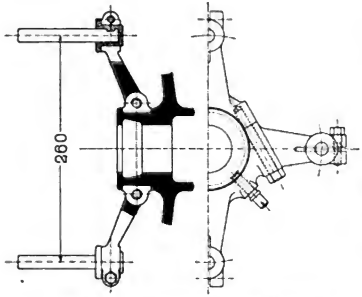


Fig. 104. Siemens-Schuckertwerke.

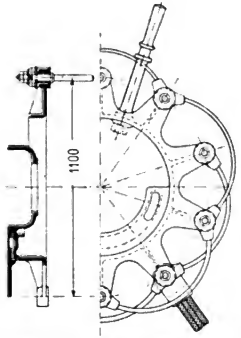


Fig. 105. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co., Prag.

Bei kleineren Maschinen wird der Bürstenträger gewöhnlich auf der Lagerhülse drehbar angeordnet, wie Fig. 104 zeigt. Diese Anordnung hat den Nachteil, daß bei einem geteilten Lager der obere Lagerdeckel erst entfernt werden kann, wenn der Bürstenträger abgenommen ist. — Dieser Übelstand ist in den Fig. 105 bis 107 vermieden. In Fig. 105 dreht

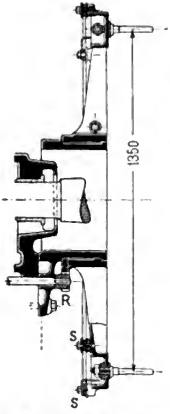


Fig. 106. E.-G. Alioth, Basel.

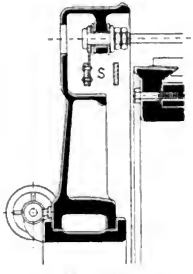


Fig. 107.

Digitized by Google

sich der Bürstenträger in einer im Lagerkörper eingedrehten Führung, und in Fig. 106 und 107 ist an dem Lagerkörper eine besondere zylindrische Führung für den Bürstenträger angeschraubt.

Während in Fig. 104 und 105 die Verstellung der Bürsten direkt von Hand und die Arretierung durch einen Handgriff mittelst einer Schraube erfolgt, dient in Fig. 106 ein kleines Rad *R*, das in ein Radsegment eingreift, zur Verdrehung des Bürstenhalters.

Um den Strom abzuleiten, werden alle positiven und alle negativen Stifte mit je einem Sammelring, in den Figuren mit *S* bezeichnet, leitend verbunden. Von diesen Sammelringen führen flexible Leitungen zu feststehenden, isolierten Klemmen, die entweder an der Maschine selbst oder am Fundament befestigt sind.

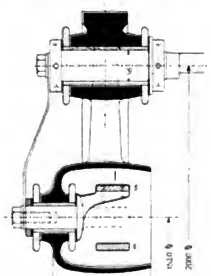


Fig. 108. A. E.-G., Berlin.

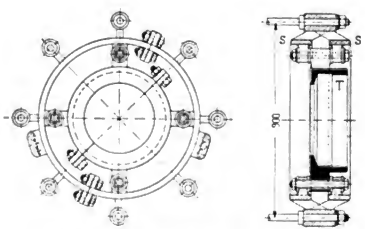


Fig. 109. Maschinenfabrik Oerlikon.

Während in Fig. 107 die Sammelringe mit der Befestigung der Bürstenstifte in einem kastenförmigen Raum des Bürstenträgers untergebracht sind, ist in Fig. 108 für die Sammelringe ein besonderer Schutz vorgesehen. Die erste Anordnung hat den Vorzug, daß auch die Verbindungen von den Stiften zu den Sammelringen geschützt sind.

Anstatt jeden Bürstenstift einzeln zu isolieren, können nach einer Konstruktion der Maschinenfabrik Oerlikon alle positiven und alle negativen Stifte ohne Isolierung in je einen gemeinsamen Ring *S* eingesetzt werden, wie Fig. 109 darstellt. Die Ringe dienen dann gleichzeitig als Sammelringe; sie sind isoliert mit einem dritten Ringe *T* verbunden, der auf einer Hülse drehbar angeordnet wird. Diese Anordnung eignet sich besonders für niedrige Spannungen und große Stromstärken. In letzterem Falle werden die

Digitized by Google

Sammelringe aus Rotguß hergestellt, sie können jedoch auch aus Gußeisen bestehen.

Fig. 110 zeigt einen Bürstenhalter, welcher auf dem Lager befestigt ist und die Bürstenstifte an beiden Enden faßt. Bei längeren Bürstenstiften ist eine Befestigung des Stiftes an beiden Enden der Stabilität wegen geboten.

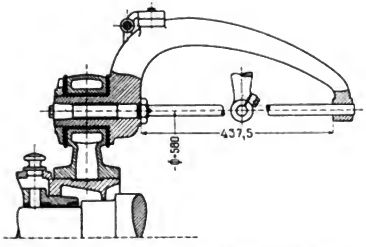


Fig. 110. Gesellschaft für Elektr. Industrie, Karlsruhe i. B.

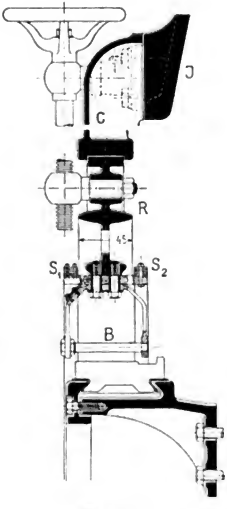


Fig. 111.

Bei der oben besprochenen Anordnung der Bürstenträger ist man namentlich bei einer großen Anzahl von Bürstenstiften in der Zugänglichkeit des Kommutators und der Bürsten etwas behindert. Man bevorzugt daher vielfach die aus Amerika stammende Konstruktion, bei der der Bürstenträger vom Joche aus festgehalten wird.

In Fig. 111 ist eine Konstruktion, wie sie in dieser und ähnlicher Form vielfach im Gebrauch ist, dargestellt. — Jeder Bürstenstift *B* sitzt in einer Gabel, die isoliert mit dem gußeisernen Ringe *R* verbunden ist. Der Ring ist in Konsolen *C*, die am Joch *J* angeschraubt sind, drehbar gelagert und kann durch ein Handrad

Digitized by Google

verstellt werden. Die Gabeln werden abwechselnd mit den Sammelringen S_1 und S_2 verbunden.

Fig. 112 zeigt eine Konstruktion, bei welcher die Sammelschienen ganz geschützt angeordnet sind.

Die Anordnung Fig. 113 ist dadurch bemerkenswert, daß der Bürstenring durch Rollen geführt wird. Es sind fünf Paar Rollen am Umfang vorhanden. Tafel II zeigt die ganze mit diesem Bürstenhalter ausgestattete Maschine.

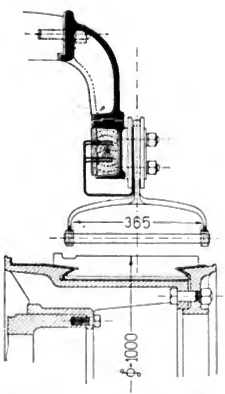


Fig. 112. Ateliers de Constr. Electr. de Charleroi.

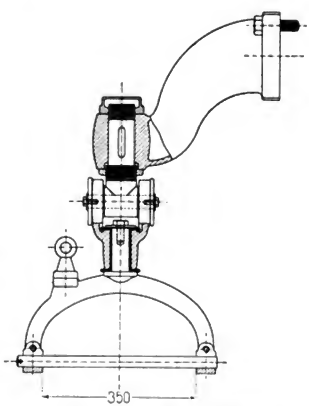


Fig. 113. Gesellschaft für Elektr. Industrie, Karlsruhe i. B.

Fig. 114 gibt das Bild einer Maschine der Westinghouse Electric and Mfg. Co., aus dem die Anordnung des Bürstenträgers und der Bürsten und die freie und leicht zugängliche Lage derselben deutlich ersichtlich ist. Der Bürstenträger ist hier in einer Eindrehung des Joches gelagert und mittelst Schnecke und Zahnradsegmentes durch ein in der Figur sichtbares Handrad drehbar.

Bei Turbogeneratoren ordnet man den Bürstenhalter öfters als besonderen Ständer auf dem Fundamentrahmen an. Beispiele für derartige Konstruktionen werden bei der Besprechung dieser Maschinen gegeben.

Fig. 115 zeigt eine Vorrichtung zum gleichzeitigen Abheben aller Bürsten eines Stiftes. In der Betriebsstellung wird die Mutter B

Digitized by Google

angespannt und hierdurch der Halter fest um den Bürstenbolzen *E* geklemmt. Die Lage dieses Bolzens wird fixiert durch die Klinke *D*,

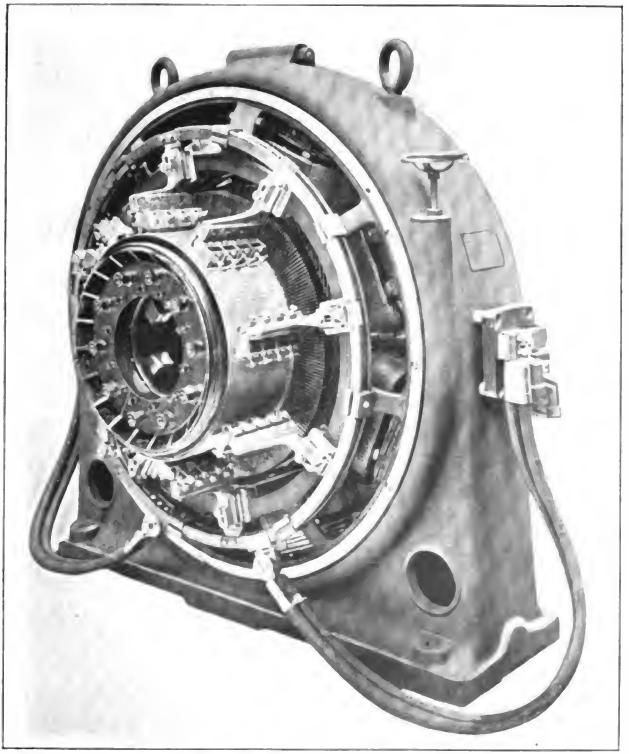


Fig. 114. Westinghouse Electric and Mfg. Co., Pittsburg.

welche sich in einen Einschnitt des mit dem Bürstenstifte fest verbundenen Hebels *A* legt. Will man die Bürsten abheben, so löst man die Schraubenmutter *B*, legt den Bolzen *F* nach oben in die

Digitized by Google

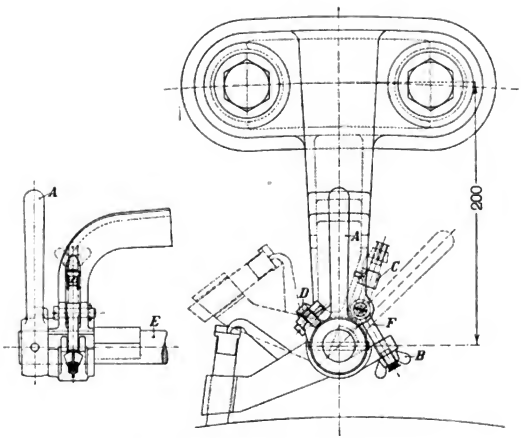


Fig. 115. Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth.

Schelle *C* und klappt die Klinke *D* zurück. Mittelst des Hebels *A* kann dann der Bürstenstift gedreht werden und das Abheben der Bürsten erfolgen.

Digitized by Google

Sechstes Kapitel.

Die Ankerwicklung.

21. Konstruktion von Ringankern. — 22. Trommelanker mit von Hand ausgeführter Drahtwicklung. — 23. Trommelanker mit Drahtwicklung aus Formspulen. — 24. Trommelanker mit Stabwicklung. — 25. Befestigung der Wicklung. — 26. Verbindung der Ankerdrähte mit dem Kommutator. — 27. Anordnung der Äquipotentialverbindungen. — 28. Querschnitt und Anzahl der Äquipotentialverbindungen.

21. Konstruktion von Ringankern.

Fig. 116, 117 und 118 zeigen einen Anker mit Grammewicklung der Maschinenfabrik Oerlikon. Er gehört zu einer vierpoligen Maschine von 40 KW Leistung bei 570 Volt, 70 Ampère und 700 Touren pro Minute.

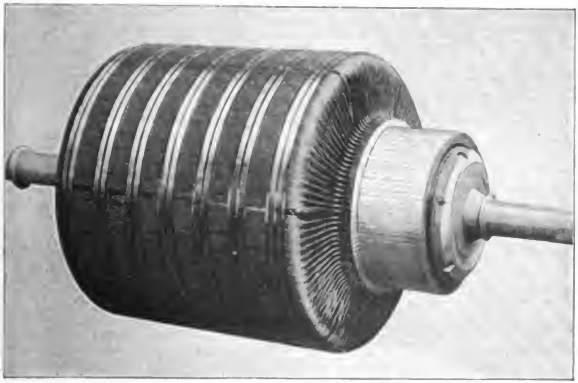


Fig. 116. Maschinenfabrik Oerlikon.

Digitized by Google

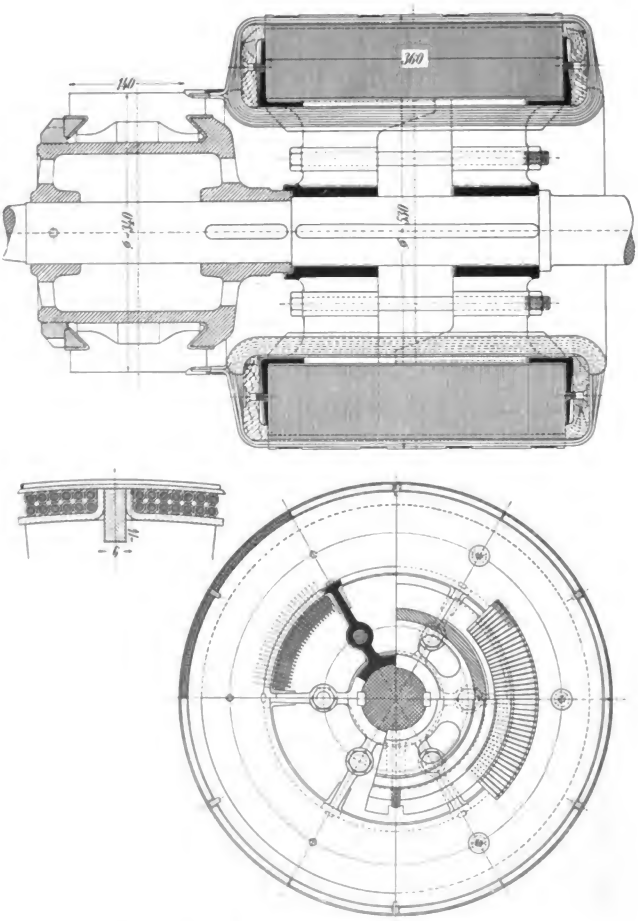


Fig. 117 und 118. Ringanker der Maschinenfabrik Oerlikon.

Digitized by Google

Die Hauptabmessungen der Maschine sind folgende:

Ankerdurchmesser .	53,0 cm	Kommutatordurchmesser	34,0 cm
Eisenlänge	36,0 „	Nutzbare Länge . . .	14,0 „
Eisenhöhe	9,2 „	Lamellenzahl . . .	160
Drahtzahl	960	Polbogen	30 cm
Drahtdurchmesser .	2,6 mm	Feldbohrung	54,8 „

Die Drähte sind am äußeren Umfange des Ringes in zwei und am inneren Umfange in sechs Lagen gewickelt. Am inneren Umfange sind die Spulen durch eingelegte Fiberstege voneinander getrennt. Die Seitenflächen des Ringes sind mit Hartholzringen, welche an dem Armatursterne festgeschraubt und deren Kanten gut abgerundet sind, bedeckt. Die Papierisolierung am äußeren und inneren Umfange überdeckt diese Holzringe auf ein kurzes Stück. Die Lamellen sind aus hartgezogenem Profilkupfer hergestellt und mit den Armaturdrähten verlötet.

22. Trommelanker mit von Hand ausgeführter Drahtwicklung.

Hinsichtlich der Art der Ausführung lassen sich die Trommelanker in zwei Gruppen einteilen, und zwar in solche mit Drahtwicklung und in solche mit Stabwicklung.

Die Drahtwicklungen kann man nach der Art der Herstellung in zwei Gruppen teilen: 1. Handwicklungen, 2. Schablonenwicklungen.

Bei der Handwicklung wird direkt auf die Trommel gewickelt. Sie verschwindet immer mehr, die meisten Fabriken wenden sie nur noch bei zweipoligen Ankern an, aber auch hier findet man vielfach Schablonenwicklung.

Es werden bei der Handwicklung gewöhnlich mehrere Spulenseiten in eine Nut gewickelt. Für die Handwicklung ermöglichen zwei oder vier Spulenseiten in einer Nut die beste Anordnung der Spulenköpfe.

In Fig. 119 ist eine Wicklung mit 14 Spulen und 14 Nuten, also mit zwei Spulenseiten in einer Nut dargestellt. Die Spulenanfänge sind mit 1, 2, 3 usf. und die Enden mit 1′, 2′, 3′ usf. bezeichnet; es ist dann das Ende der einen Spule mit einer Lamelle und dem Anfange der folgenden Spule zu verbinden. Wir erhalten also, wenn K eine Lamelle bedeutet, das Verbindungsschema

$$(1 — 1') — K_1 — (2 — 2') — K_2 — (3 — 3') — K_3 — (4 — 4') — K_4 \text{ usf.}$$

Um eine möglichst symmetrische Lage der Drahtbündel und ein schönes Aussehen der Wicklung zu erhalten, werden die Spulen paarweise gewickelt und zwar ohne Kreuzung der Drähte eines Paares.

Digitized by Google

Die Spulenpaare werden in der Reihenfolge I, II, III usf. gewickelt, und zwei aufeinander folgende Paare bilden einen Winkel von 90^0 oder nahezu 90^0.

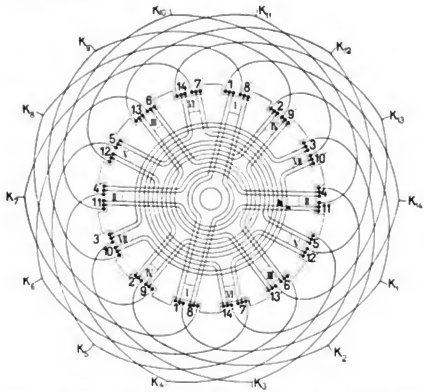


Fig. 119. Symmetrische Verteilung der Wicklung auf den Stirnflächen des Ankers.

Man wickelt also zuerst die Spule $1 - 1'$, welche in der Figur aus 3 Windungen besteht, dann $8' - 8$, ferner $4 - 4'$, dann $11' - 11$

Fig. 120. Ankerwicklung nach dem Schema Fig. 119.

usf. und läßt die Enden frei vorstehen. Wenn alle Spulen gewickelt sind, können die Verbindungen der Spulen mit dem Kommutator hergestellt werden.

In der Fig. 119 sind dieselben der Deutlichkeit wegen nach außen verlegt.

Digitized by Google

In Fig. 120 ist ein zweipoliger Anker abgebildet, dessen Drähte nach dem Schema Fig. 119 in Nuten gewickelt sind.

Ein Verfahren für zweipolige Anker, welches der fertigen Wicklung ebenfalls ein gutes Aussehen gibt, ist in Fig. 121 dargestellt.

Fig. 121. Wicklung mit über den Anker zurückgelegten Endverbindungen.

Diese Wicklungsart entspricht dem Schema Fig. 103, S. 97, Bd. I. Bezugnehmend auf diese Figur wird die Wicklung so ausgeführt, daß von der Lamelle *a* ausgehend, die Spulenseite 1 längs der entsprechenden Nut auf die hintere Ankerseite geführt wird, woselbst die Hälfte des Schrittes 1—8 zurückgelegt wird. In ähnlicher Weise wird mit den Spulenseiten 3, 5 usf. verfahren, bis alle mit ungeraden Nummern versehenen Spulenseiten in die entsprechenden Nuten eingelegt sind. Es werden dabei die auf der hinteren Ankerseite vorstehenden Enden der Spulenseiten auf einen auf die Welle aufgeschobenen Holzring gelegt, der später entfernt wird. Der durch die halben Wicklungsschritte gebildete Wicklungskopf wird jetzt mit einer Lage Isolierstoffes bedeckt und der Reihe nach die zweite Hälfte des Schrittes auf der hinteren Ankerseite ausgeführt. Die mit geraden Nummern versehenen Spulenseiten werden längs der entsprechenden Nuten auf die Kommutatorseite gebracht und dort mit den Lamellen verbunden (z. B. längs der Nut 8, dann zu Lamelle *b*).

Haben wir vier Spulenseiten in einer Nut, so ergibt sich die Anordnung Fig. 122. Wir numerieren fortlaufend mit 1, 2, 3, 4 usf., die abwechselnd rechts unten und links oben in der Nut liegenden Spulenseiten. Für eine Durchmesserwicklung ergeben sich dann sofort die Lagen der anderen Spulenseiten 1′, 2′,

Digitized by Google

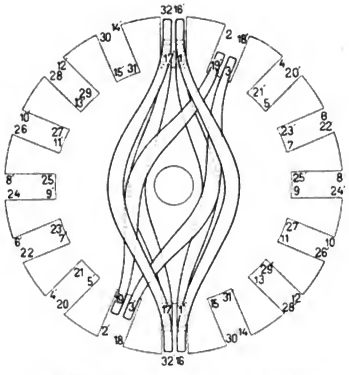


Fig. 122. Durchmesserwicklung mit vier Spulenseiten in einer Nut.

3′, 4′ usf., welche so gewählt sind, daß die Drahtbündel derselben Nut sich nicht kreuzen.

Soll die Wicklung dagegen als Sehnenwicklung ausgeführt werden, so liegen die Spulenseiten 1, 2, 3, 4 usf., wie Fig. 123 zeigt, auf der einen Seite und die Seiten 1′, 2′, 3′, 4′ usf. auf der andern Seite der Nuten.

Das Verbindungsschema ist in beiden Fällen wie früher

$(1 — 1') — K_1 — (2 — 2') — K_2 — (3 — 3') — K_3 — (4 — 4') — K_5$ usf.

Eine sehr schöne Handwicklung (sog. Zopfwicklung), welche einer Schablonenwicklung gleichwertig ist, erhält man auf folgende, früher in den Werkstätten von Brown, Boveri & Co. vielfach gebrauchte Methode, indem man jede Wicklungslage für sich fertigstellt. Man beginnt, wie in Fig. 124 für eine Schleifenwicklung dargestellt ist, mit der Wicklung auf der Kommutatorseite bei A und legt in jede Nut eine Drahtlage ABC, die vorn und hinten um den halben Wicklungsschritt abgebogen wird. Nachdem so die erste Drahtlage hergestellt ist (in der Figur von A bis A' angedeutet), wird sie mit einer Isolierschicht bedeckt und über diese die zweite Drahtlage gewickelt,

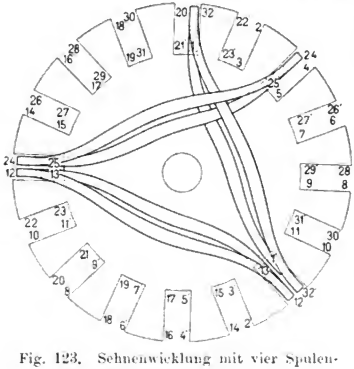


Fig. 123. Sehnenwicklung mit vier Spulenseiten in einer Nut.

Digitized by Google

indem man die Drähte in Richtung *CDA* zurücklegt. Nachdem die zweite Lage mit einer Isolierschicht bedeckt ist, kann die

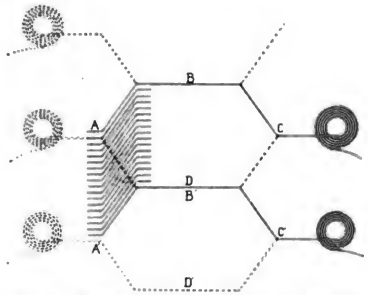


Fig. 124 Schema für Handwicklung mit einzelnen Wicklungslagen.

dritte ebenso wie die erste und eine vierte ebenso wie die zweite hergestellt werden.

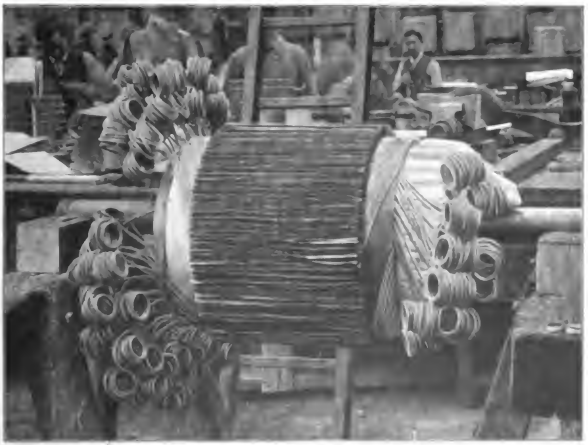


Fig. 125a. Ankerwicklung nach dem Schema Fig. 124 in unfertigem Zustande.

Digitized by Google

Diese Wicklung wird für 4, 8 und 12 Drähte pro Nut, wobei 2 Drähte nebeneinander und bezw. 2, 4, 6 Drähte übereinander liegen als 1, 2 oder bezw. 3fache Zopfwicklung hergestellt. Auch für die Rotorwicklungen kleiner Drehstrommotoren wird sie benutzt.

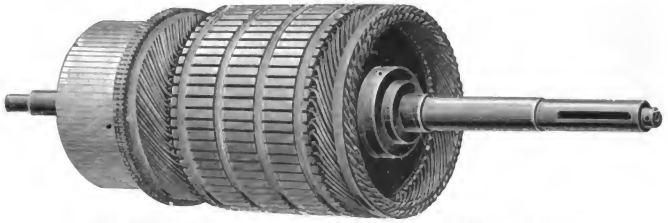


Fig. 125b. Nach dem Schema Fig. 124 fertig bewickelter Anker.

Einen auf diese Art gewickelten Anker in halbfertigem und fertigem Zustande zeigen die Fig. 125a und 125b. In Fig. 125b sind die vier Drahtlagen auf der Rückseite deutlich sichtbar.

Für mehrpolige Anker gelten dieselben eben angegebenen Spulenanordnungen. Hier sind jedoch Formspulen unbedingt vorzuziehen.

23. Trommelanker mit Drahtwicklung aus Formspulen.

Mit dem Namen Schablonenwicklung oder Wicklung mit Formspulen belegt man eine solche Wicklung, deren Spulen vor dem Aufbringen auf den Anker einzeln nach einer Schablone hergestellt werden und dabei eine Gestalt erhalten, welche sie unverändert oder nahezu unverändert auf dem Armaturkörper beibehalten.

Die Schablonenwicklung hat folgende Vorteile: erstens kann die Isolierung der Spulen sehr sorgfältig ausgeführt werden, zweitens ermöglicht sie eine billige und schnelle Herstellung der Wicklung bei Massenfabrikation, drittens erhalten alle Spulen gleiche Windungslängen und eine gleiche Lage auf dem Anker, was eine funkenfreie Kommutation begünstigt, viertens kühlen sich Schablonenwicklungen besser ab als Handwicklungen, bei denen die Spulenköpfe einen festen Knäuel bilden, und fünftens können bei Beschädigung der Wicklung einzelne Spulen gegen neue ausgewechselt werden.

Digitized by Google

Für die Herstellung der Formspulen gibt es verschiedene Verfahren, die gebräuchlichsten sind nachfolgend beschrieben.

Erstes Verfahren. Die Herstellung einer Formspule wird am einfachsten, wenn die Spulenseiten in zwei Lagen übereinander liegen und Mantelwicklung gewählt wird.

In Fig. 126a ist ein Teil einer sechspoligen Wicklung mit 40 Nuten, 40 Spulen und $y_1 = 13$ dargestellt. Die Spulenseite A liegt in der oberen und die Seite B in der unteren Hälfte der Nut. Denken wir uns die Spule aus dem Anker herausgehoben und so zusammengedrückt, daß B unter A zu liegen kommt, so erhält sie die Form Fig. 126 b und c, es läßt sich daher folgendes Verfahren für die Herstellung der Spulen anwenden.

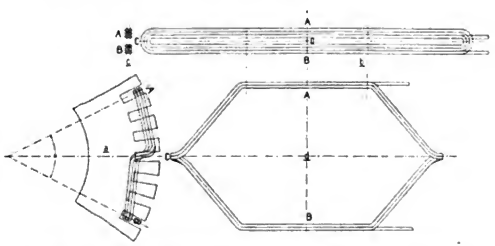


Fig. 126. Mit Scherenschablone hergestellte Formspule.

Der Draht wird von einem Haspel auf einen um den Punkt O drehbaren Rahmen (Schablone) aufgewickelt, bis die erforderliche Windungszahl erreicht ist. Werden zwei oder mehr Drähte parallel geschaltet, so sind diese gleichzeitig aufzuwickeln. Nun werden die Drähte gewöhnlich durch schmale Bleistreifen an mehreren Stellen in ihrer gegenseitigen Lage festgehalten.

Werden jetzt die Seiten A und B der Spule seitlich auseinander gezogen, so entsteht die im Grundriß (AdB) dargestellte Form. Zu diesem Auseinanderscheren der Spule kann eine besondere Vorrichtung benutzt werden. Eine solche Vorrichtung ist z. B. im Engl. Patent 7373 vom Jahre 1900 von W. Langdon-Davies und A. Soanes beschrieben. Die innere Spulenseite B wird dabei festgehalten und die Seite A auf einem Kreisbogen, dessen Radius gleich dem Ankerdurchmesser ist, um die Spulenweite gegen B verschoben, wodurch die Seiten A und B zugleich die richtige radiale Stellung erhalten.

Digitized by Google

Einfacher und leistungsfähiger wird das Verfahren, wenn das Aufwickeln und Auseinanderscheren der Spule mit derselben Schablone erfolgt.

Die Schablone wird zu dem Zwecke entweder mit Gelenken versehen, welche ein Zusammenklappen, und um die radiale Stellung der Spulenseiten einstellen zu können, auch ein Verdrehen der Seiten *A* und *B* um ihre eigene Achse gestatten, oder man stellt die Schablone aus verschiebbaren Teilen her. Diese Gelenkschablonen und Scherenschablonen sind vielfach im Gebrauch.

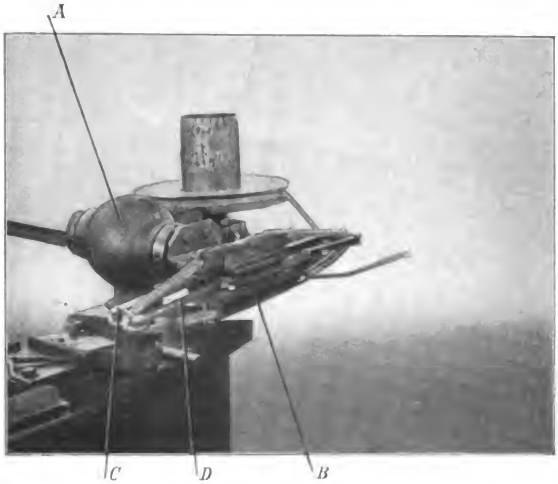


Fig. 127. Scherenschablone während des Wickelns einer Spule.

Eine Scherenschablone ist in Fig. 127 und 128 dargestellt. In der in Fig. 127 angegebenen Stellung wird die Spule gewickelt, indem der ganze Mechanismus in dem Ständer *A* drehbar ist. Nachdem die Spule gewickelt ist, wird die Rinne *B*, in welcher sich die eine Seite der Spule befindet, ausgezogen und man erhält die in Fig. 128 dargestellte Stellung. Aus dieser Figur ist gut ersichtlich, wie durch das Auseinanderspreitzen der Hebel *C* und *D* die Spule die richtige Form erhält.

Digitized by Google

Solange eine Spule aus wenigen Windungen besteht und der Ankerdurchmesser groß ist, ist bei der Formgebung der Spule eine besondere Rücksicht auf die radiale Stellung der Spulenseiten nicht erforderlich, bei kleinen Ankerdurchmessern und vieldrähtigen Spulen ist das jedoch unerläßlich, wenn der Nutenraum gut ausgenutzt werden soll.

Eine Scherenschablone, welche die durch den Winkel α (Fig. 126) bestimmte radiale Stellung der Nuten berücksichtigt, ist in Fig. 129 skizziert.

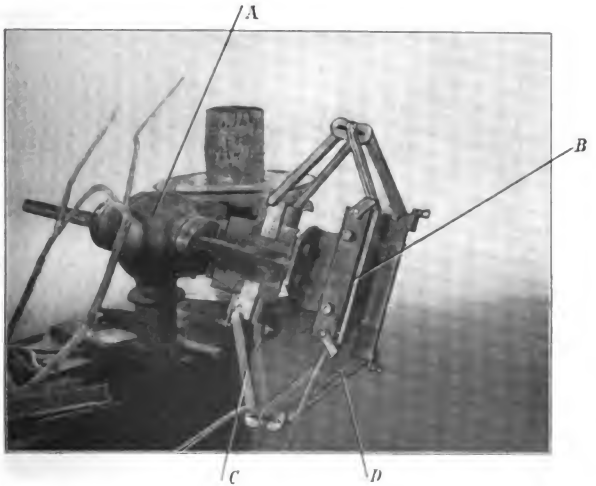


Fig. 128. Scherenschablone in auseinandergespreiztem Zustande.

B_1 und B_2 sind hölzerne, in Eisen gefaßte Backen, deren Einschnitte genau dem Wicklungsraum einer Spule entsprechen und deren Länge und Neigung gleich der Länge und Neigung der Nuten sind, in die die Spule zu liegen kommt.

Einer dieser Backen, der obere B_1, ist fest auf die Stirnseite eines Eisenzylinders A aufgesetzt, der seinerseits in einem Lager gedreht und nach vorn und hinten verschoben werden kann. Dieser Zylinder dient beim Aufspulen des Drahtes als Achse.

Digitized by Google

Der zweite Backen B_2 ist an einem Flacheisenstab F befestigt, der in einer Führung des Zylinders A verschiebbar ist. Ist F ganz

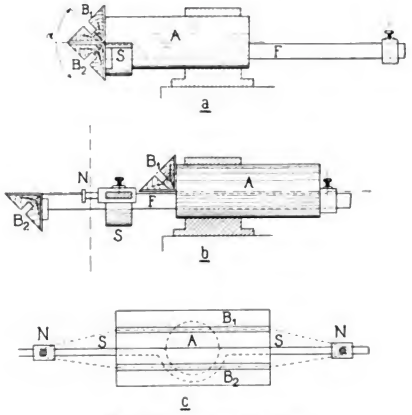


Fig. 129. Scherenschablone.

hinein gestoßen, so liegen beide Holzbacken knapp übereinander; dies ist die Stellung *a* beim Aufspulen des Drahtes.

Der Draht steht um die Länge eines Spulenkopfes zu beiden Seiten über die Holzbacken vor und wird mittels zweier auf einem

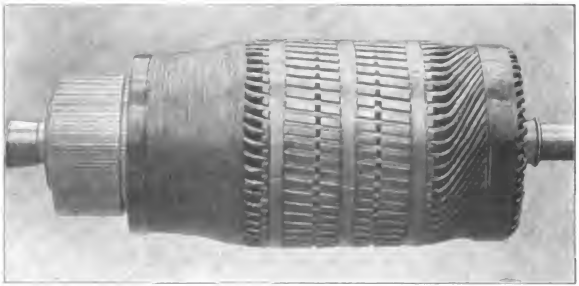


Fig. 130.

Digitized by Google

Stabe S, der in Fig. 129b im Querschnitt sichtbar ist, verschiebbarer Stifte N eingestellt. Der Querstab S steht auf beiden Seiten der Holzbacken um so viel vor, daß jede gewünschte Windungslänge eingestellt werden kann. Wenn die Aufspulung beendet ist, werden die verschiebbaren Stifte N gelöst und die Backen B_1 und B_2, wie Fig. 129b zeigt, von Hand auseinander gezogen. Der Querstab S wird dabei in einer solchen Lage festgehalten, daß er in der Mitte der auseinandergezogenen Backen B_1 und B_2 liegt.

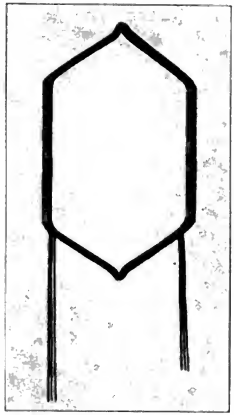


Fig. 131.

Durch eine so hergestellte Spule könnte eine Ebene gelegt werden. Da die Spule jedoch auf einen Zylinder zu liegen kommt, müssen die Spulenköpfe entsprechend gebogen werden, was auf der Wickelbank selbst durch eine Abwärtsbewegung des Stabes S mit den Stiften N, oder später beim Einlegen der Spulen geschehen kann.

Solange eine Spule aus dünnen Drähten oder aus wenigen Drähten besteht, läßt sich das Scheren der Spule leicht ausführen, und dieses Verfahren ist dann das beste von allen.

In Fig. 130 ist das Bild eines fertigen zweipoligen Ankers, dessen Spulen auf diese Weise hergestellt sind, dargestellt, und

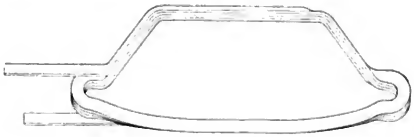


Fig. 132. Spule aus Kupferband.

Fig. 131 zeigt eine fertig isolierte zum Einlegen in die Nuten bereite dreifache Spule eines vierpoligen Ankers.

Das beschriebene Verfahren ermöglicht, Spulen aus Kupferband herzustellen (Schweiz. Pat. Nr. 21731 v. J. 1900 von Mallet). In

Digitized by Google

Fig. 132 ist eine solche aus vier Windungen bestehende Spule dargestellt.

Zweites Verfahren. Bei diesem Verfahren wird die Spule nicht in zusammengeklapptem Zustande, sondern in der geforderten Weite und ohne Kröpfung gewickelt.

Wird auf die radiale Stellung der Nuten keine Rücksicht genommen, so erhält die fertige, in einem passenden Rahmen aufgewickelte Spule die Form Fig. 133. Sie wird in dieser Form isoliert, erst beim

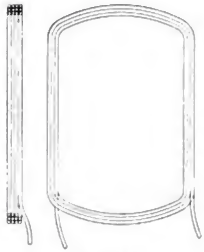


Fig. 133.

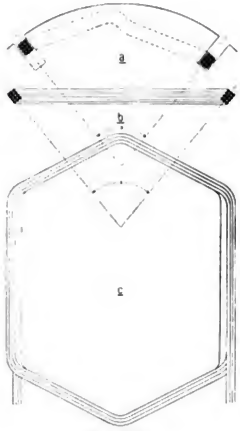


Fig. 134.

Einlegen in die Nut erhält sie von Hand die Kröpfung und die richtige Lage.

Diese Herstellungsart ist nur für dünndrähtige Spulen möglich.

Fig. 135. Spule eines 30 PS Bahnmotors der Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi in drei verschiedenen Fabrikationsstadien.

Digitized by Google

Zur Erläuterung einer anderen Ausführung des zweiten Verfahrens dient die in Fig. 134 dargestellte Wicklung des Ankers eines vierpoligen Trambahnmotors.

In jeder Nut liegen 6 Spulenseiten und es werden drei Spulen gemeinsam gewickelt. In diesem Falle wird das Drahtbündel einer dreifachen Spule so steif, daß das Auseinanderscheren die Umspin-

Fig. 136. Einbau der Ankerspulen Fig. 135.

nung der Drähte gefährden würde. Ein bequemes Wickeln der Spulen wird jedoch erreicht, indem man sie ohne Kröpfung mittels einer Holzschablone in die durch die Fig. 134b und 134c dargestellte Form wickelt, wobei den Spulenseiten die erforderliche radiale Stellung gegeben wird. Mit einer zweiten zweiteiligen Holzschablone wird die so gewickelte Spule in die fertige abgekröpfte Form der Fig. 134a gepreßt.

Das Bild einer solchen Spule in den drei verschiedenen Fabri-

Digitized by Google

kationsstadien, d. h. ungepreßt, mit eingepreßter Kröpfung und mit Baumwollband bewickelt, zeigt die Fig. 135. Diese Spulen gehören zu dem Anker eines 30 PS Straßenbahnmotors der Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

Die Spulen werden vor dem Einlegen in die Nuten nach Fig. 135 fertig isoliert.

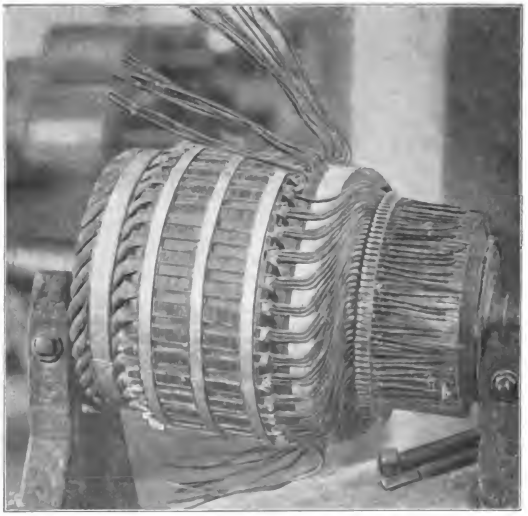


Fig. 137. Verbinden der Spulen mit dem Kommutator.

Die Herstellung der Wicklung und das Verbinden der Spulen mit dem Kommutator veranschaulichen die Fig. 136 und 137. Fig. 136 zeigt den Zustand der Bewicklung, in welchem eine Seite der zuerst eingelegten Spulen wieder aus den Nuten herausgehoben ist, damit die letzten Spulen von der andern Seite eingelegt werden können.

Zum Kommutator werden erst alle inneren Enden, die eine Wicklungslage bilden, geführt, dann mit Isolierstoff bekleidet und darüber, wie Fig. 137 zeigt, die äußeren Enden der Spulen

Digitized by Google

gelegt und mit dem Kommutator verbunden; es erfolgt dann das Verlöten mit den Lamellen.

Drittes Verfahren. Die ersten zwei Verfahren lassen sich nicht mehr anwenden, wenn die Spulenköpfe auf den Stirnseiten des

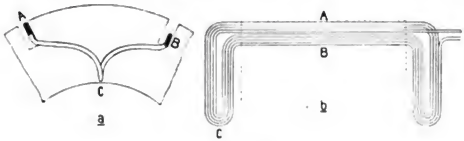


Fig. 138.

Ankers abgebogen werden, wie es in Fig. 138 gezeigt ist. Denken wir uns wiederum die Spule so zusammengedrückt, daß *B* unter *A*

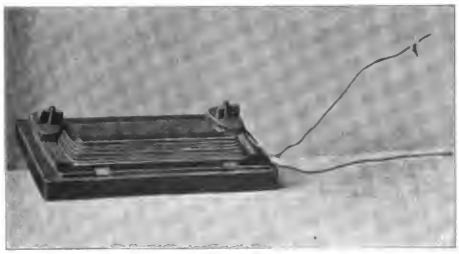


Fig. 139. Plattenschablone.

zu liegen kommt, so entsteht Fig. 138b. Diese Spule kann auf einer sogen. Plattenschablone gewickelt werden. Diese Schab-

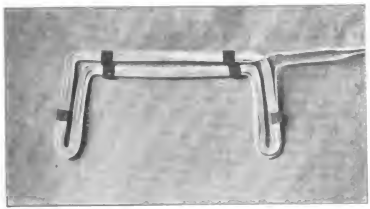


Fig. 140. Auf Plattenschablone hergestellte Spule.

Digitized by Google

lone, die in Fig. 139 dargestellt ist, besteht aus einer auf einem Tisch um eine Achse drehbaren Messing- oder Zinkplatte, welche für die Drahtführung entsprechende Erhöhungen besitzt, so daß die Drähte in die geforderte Lage gewickelt werden können. Da die

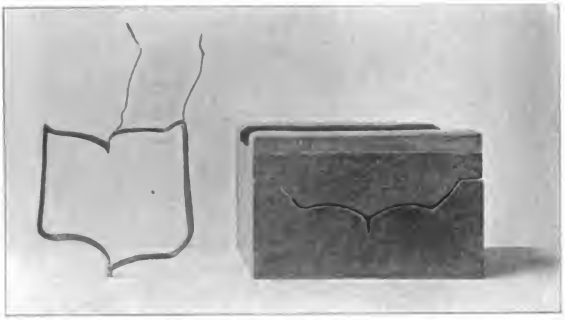


Fig. 141. Zweiteilige Holzschablone zum Pressen der Spulen Fig. 140.

Schablone drehbar ist und der Wickler, ebenso wie bei dem früheren Verfahren, nur in einer Ebene zu wickeln braucht, ist diese Einrichtung für Massenfabrikation ebenfalls gut geeignet. Nachträglich werden die Spulen in eine zweite hölzerne Schablone (Fig. 141) gepreßt, welche ihnen die endgültige Form gibt.

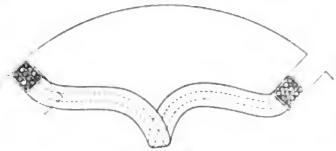


Fig. 142.

Die Abbildung einer Spule im zusammengeklappten Zustande und in fertiger Form mit der dazugehörigen zweiteiligen Presse zeigen die Fig. 140 und 141.

Zum Einlegen in Nuten können nun zwei oder drei Spulen vereinigt und gemeinsam isoliert werden, so daß z. B. eine Anordnung entsteht, wie sie in Fig. 142 für drei Spulen dargestellt ist.

Viertes Verfahren. Während bei den bisherigen Verfahren die Spule erst nach dem Wickeln in die fertige Form gebracht wurde, wird bei dem nachfolgenden Verfahren jeder Draht in die endgültige Form der Spule gewickelt. Diese Herstellungsart hat

Digitized by Google

vor den anderen den Vorzug, daß die Isolation von stärkeren Drähten mehr geschont wird.

Hierher gehört die Schablonenwicklung der E.-G. Alioth in Basel, D. R. P. Nr. 34783 vom 17. März 1885; diese Firma hat die ersten Schablonenwicklungen ausgeführt.

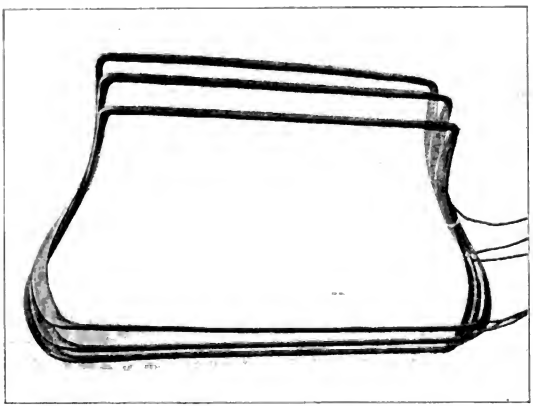


Fig. 143. Spulen der Schablonenwicklung der E.-G. Alioth.

Die Gestalt von drei aufeinanderfolgenden Spulen ist in Fig. 143 dargestellt. Sie werden auf hölzernen Schablonen von der in Fig. 144 dargestellten Bauart gewickelt. Die Schablone besteht im wesentlichen aus vier Teilen, einer Bodenplatte a und drei aufgeschraubten Teilen b, c und d. In der Figur ist am Fuße der stehenden Schablone eine zweite auseinandergeschraubte Schablone a_1, b_1, c_1, d_1 dargestellt.

Für die geschweiften Teile der Spule ist zwischen b, c und c, d Raum freigelassen, während diejenigen Drähte, die an den Umfang der Armatur zu liegen kommen, längs der geraden Seite von c gewickelt werden. Um die Spule herausnehmen zu können, müssen die Teile b, c und d entfernt werden.

Die Spule beschreibt zu beiden Seiten der Trommel eine Art Schraubenlinie um einen röhrenförmigen Hohlraum von kreis- oder ellipsenförmigem Querschnitt. Damit die Drähte Platz finden, muß die axiale Höhe des seitlichen Wulstes, von der Stirnfläche der

Digitized by Google

Trommel an gerechnet, mindestens $= \frac{y_1 + y_2}{2} \cdot d$ sein, wenn d den Drahtdurchmesser bedeutet, und am inneren Umfange des Wulstes müssen sämtliche Drähte noch Platz finden.

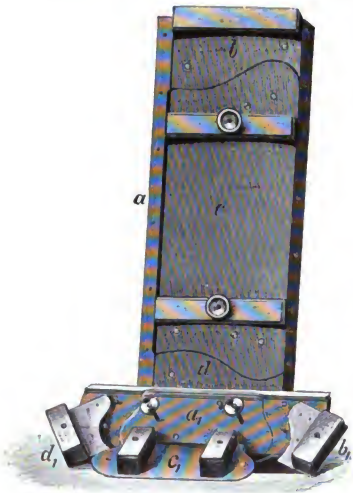


Fig. 144. Schablone zur Wicklung der E.-G. Alioth.

Die Alioth'sche Schablonenwicklung ist diejenige Wicklung, welche die kleinste Drahtlänge erfordert.

Das Charakteristische der Alioth'schen Wicklung besteht ferner darin, daß die scharfe Abkröpfung des Drahtes ganz vermieden ist. Wenn man die beiden Spulenseiten zusammenklappt, so erhält man die Fig. 145.

Die Anwendung dieses Prinzipes hat Nachahmung gefunden. Um eine möglichst kleine Windungslänge und eine allmähliche Überführung des Drahtes von einer Wicklungsebene in die andere zu erhalten, biegt z. B. Hobart den Draht des Spulenkopfes, wie in Fig. 146 dargestellt ist, längs drei gleichen Seiten A, B, C eines Polygons, an dessen Ecken der Draht in leichter Rundung gebogen wird. Die

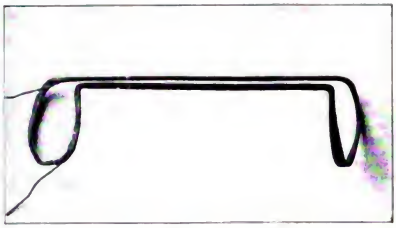


Fig. 145.

Digitized by Google

Seite *A* liegt auf einer zylindrischen, *B* und *C* liegen auf einer konischen Fläche.

Die Spule kann in diesem Falle, ebenso wie nach dem dritten Verfahren, auch in einer Ebene gewickelt werden, wie Fig. 148 zeigt. Nach dem Öffnen der Spule erhält sie die in Fig. 147 dargestellte Form. Fig. 149 gibt das Bild eines Ankers der Westinghouse Electric and Mfg. Co., in welchem eine Anzahl derartig geformter Spulen eingelegt sind.

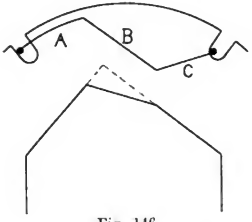
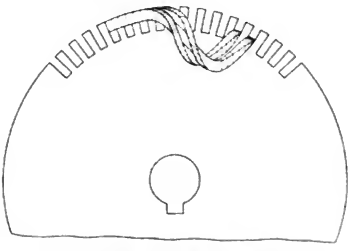


Fig. 146.



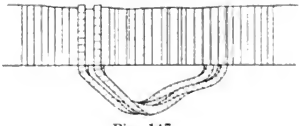


Fig. 147.

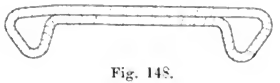


Fig. 148.

Die Neigung und Länge der Seite *B* in Fig. 146 läßt sich in verschiedener Weise variieren. Es kann z. B. *B* kürzer als $^1/_3$ der Länge des Spulenkopfes sein und radial laufen, wie aus Fig. 150 ersichtlich ist. Durch eine starke Verkleinerung von *B* kommt man schließlich wieder zu einer Spule mit scharfer Kröpfung zurück.

Eine Schablone der E.-G. Alioth, bei der die Seite *B* (Fig. 150) schon erheblich verkürzt ist, zeigt Fig. 151. Bei dieser Schablone sind nur für die Spulenseiten *ab* und *ed* Nuten vorgesehen, während die Spulenköpfe offen liegen.

Der Vorgang beim Wickeln ist folgender:

Um ein Element zu wickeln (s. Fig. 152) wird bei *a* begonnen und nach *b* gefahren. Weil diese Strecke gerade ist, können die Drähte mit Leichtigkeit in eine Nut eingelegt werden. Beim Spulenkopf *bcd* ist dies nicht mehr der Fall, hier haben die Drähte nur auf der unteren und inneren Seite gegen die Schablone zu eine

Digitized by Google

feste Auflage, die zwei äußeren Flächen bleiben offen, um ein bequemes Abbiegen der Drähte zu ermöglichen. Sind die Drähte von *b* bis *c* und *c* bis *d* abgebogen, so werden sie mittelst zweier Klammern B_1 und B_2 festgehalten; von *d* bis *e* längs der Spulenseite bedarf es keiner weiteren Vorrichtung mehr, da die Drähte in der Nut der Schablone liegen. Der andere Spulenkopf *efa* wird in gleicher Weise wie *bcd* gewickelt. Am Punkte *a* angekommen, geht der Draht in die zweite Windung, welche in gleicher Weise wie die erste gewickelt wird.

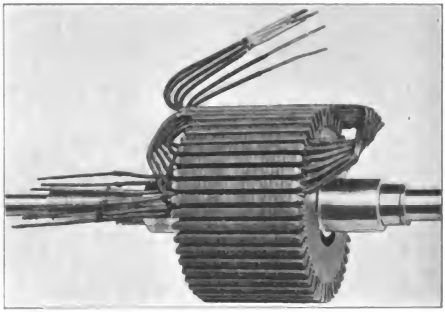


Fig. 149. Westinghouse Electric and Mfg. Co.

Das Bild einer auf dieser Schablone gewickelten fünffachen Spule gibt Fig. 153.

Zu den bekanntesten und sowohl für glatte als genutete Anker vielfach angewandten Schablonenwicklungen gehört die von R. Eickemeyer, D. R. P. Nr. 54413 vom 14. Februar 1888.

Fig. 150.

In den Fig. 154 und 155 ist die Gestalt der Spule eines zweipoligen glatten Trommelankers mit vier Windungen abgebildet. Die Seiten *a* und *b* liegen am Umfange und die Seiten *c*, *e* und *d*, *f* auf den Stirnseiten der Trommel. Die auf den Stirnflächen

Digitized by Google

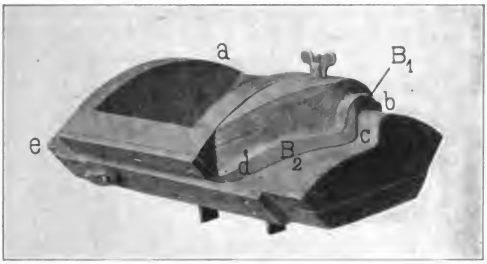


Fig. 151. Schablone der E.-G. Alioth.

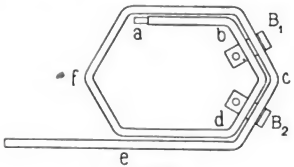


Fig. 152.

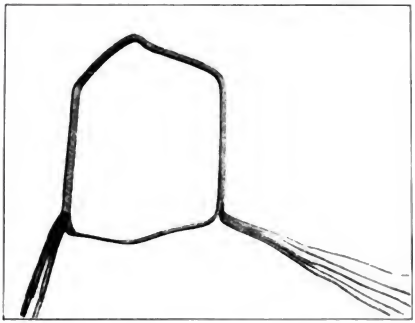


Fig. 153. Spule einer Schablonenwicklung der E.-G. Alioth.

liegenden Seiten sind nach Kreisevolventen gekrümmt, wie aus Fig. 155 ersichtlich ist. In der Mitte ist der Draht abgekröpft, so

Digitized by Google

daß bei dem Zusammensetzen der Wicklung die Seiten *c*, *d* in die eine und die Seiten *e*, *f* in die andere Ebene zu liegen kommen, wodurch eine Berührung der sich kreuzenden Drähte vermieden wird.

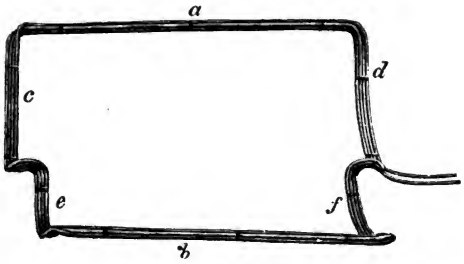


Fig. 154. Spule einer Schablonenwicklung nach Eickemeyer.

Am Umfange der Trommel (Seiten *a* und *b*) liegen zwei Drähte übereinander und zwei nebeneinander, an den Seitenflächen müssen dagegen die vier Drähte übereinander gewickelt werden, damit hier sämtliche Drahtspulen Platz finden.

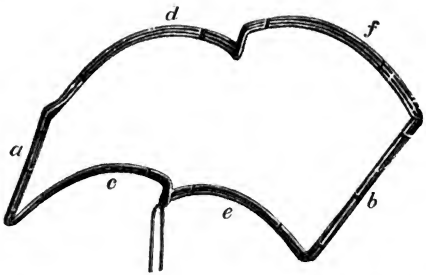


Fig. 155. Spule einer Schablonenwicklung nach Eickemeyer.

Denkt man sich die Spule in die Papierebene flach gedrückt und die Drähte auch am äußeren Umfange übereinander gewickelt, so erhält man die Fig. 138b.

Digitized by Google

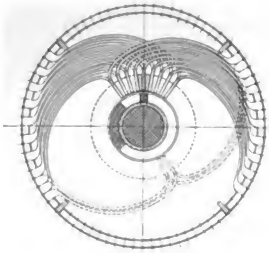


Fig. 156.

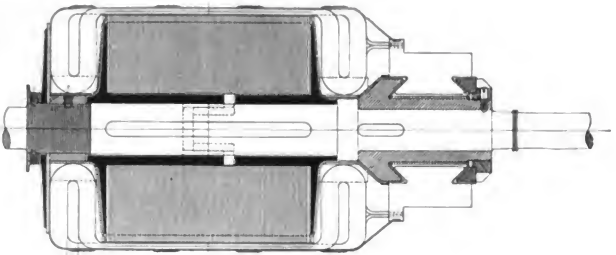


Fig. 157.

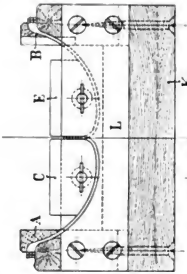


Fig. 158a.

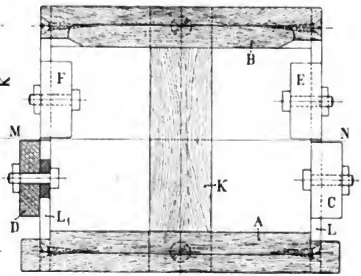


Fig. 158b.

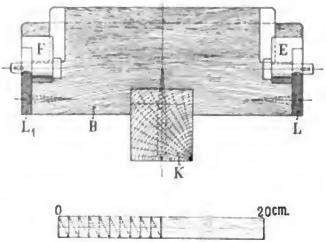


Fig. 159.

Fig. 156 und 157. Trommelanker mit Eickemeyer-Wicklung.
Fig. 158a, 158b und 159. Schablone zum Trommelanker nach Fig. 156 und 157.

Digitized by Google

Nach den oben gemachten Angaben ist in den Fig. 156 und 157 ein Trommelanker mit Eickemeyer-Wicklung entworfen und in den Fig. 158 und 159 die dazu passende Schablone beigefügt.

Am Ankerumfange liegen 480 Drähte, welche in 40 Spulen von je 6 Windungen eingeteilt sind; der Kommutator erhält somit 40 Lamellen. Diese Drahtzahl muß am Ankerumfange in drei Lagen angeordnet werden; an den Stirnflächen des Ankers ist dagegen, wie die Konstruktion der Fig. 156 ergibt, für sämtliche Drähte nur dann Platz, wenn hier 6 Drähte übereinander gewickelt werden.

Wenn die Spulenform auf diese Weise bestimmt ist, kann zur Konstruktion der Schablone geschritten werden, welche der ermittelten Spulenform genau anzupassen ist. In Fig. 158b ist der Grundriß, in Fig. 158a die Ansicht von *N* aus gesehen und in Fig. 159 der Längsschnitt *MN* der Schablone aufgezeichnet.

Diese besteht aus einem Rahmen, der durch die Holzstücke *A*, *K*, *B* und die Eisenbleche *L*, L_1 gebildet wird. An den Eisenblechen sind zwei äußere Formstücke aus Blei oder Zinn *C*, *D* und zwei innere *E*, *F* mittelst Bolzens und Keils befestigt. Die Stärke der Eisenbleche wird entsprechend dem Abstande der Spulen x (Fig. 157) gewählt, und die Formstücke werden nach der in Fig. 156 festgelegten Form der Kreisevolvente bearbeitet.

Beginnt man mit der Wicklung der Spule bei *M*, so wird der Draht zunächst in den zwischen *D* und *F* freigelassenen Schlitz eingeklemmt und dann wie folgt geführt: Nach der Innenseite des Rahmens, um das Formstück *F*, längs der Seite *B*, um das Formstück *E*, nach der Außenseite des Rahmens, um das Formstück *C*, längs der Seite *A*, um das Formstück *D*, nach der Innenseite des Rahmens usf. Man beginnt natürlich mit der Windung, welche an den Blechen *L* und L_1 anliegt. Die großen Buchstaben der Fig. 158 und 159 entsprechen der Lage nach den kleinen Buchstaben der Fig. 154.

Um die Spule aus dem Rahmen entfernen zu können, müssen die Formstücke *C*, *D*, *E* und *F* entfernt werden; vorher versieht man die Spule mit kleinen Schnurbändern, welche die Drähte in der gegebenen Lage festhalten. Die Spulen werden nun mit einem Lack oder einer Gummilösung bestrichen, getrocknet und dann auf dem isolierten Armaturkörper befestigt.

Liegen die Ankerdrähte in Nuten, so ist das Verfahren für die Herstellung der Schablone dasselbe.

Werden die Spulen zu beiden Seiten der Anker nach der Welle zu abgebogen, wie das bei den Eickemeyer-Wicklungen der Fall

Digitized by Google

ist, so ist es bei kleinen Ankern nötig, die Drähte auf den Stirnflächen des Ankers anders anzuordnen als am Ankerumfange (s. Fig. 156 und 157), und in vielen Fällen ist nicht genügend Platz vorhanden. Diese Schwierigkeit wird umgangen, wenn die Spulenköpfe auf einer konischen Fläche wie in Fig. 160 angeordnet werden.

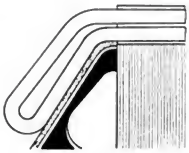


Fig. 160.

Heute ist es meist üblich, die Spulenköpfe auf demselben Zylinder wie die Spulenseiten anzuordnen, die mechanische Ausführung wird einfacher, und die Abkühlung ist eine bessere. Wir bezeichnen diese Wicklung als Mantelwicklung. Die Schablone für eine solche Wicklung gestaltet sich einfach.

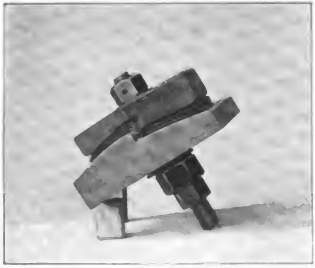


Fig. 161a.

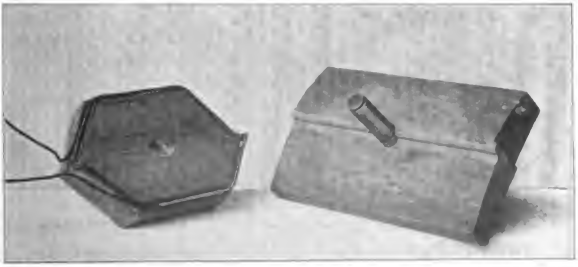


Fig. 161b.

Fig. 161a und b. Schablone für Mantelwicklung.

Digitized by Google

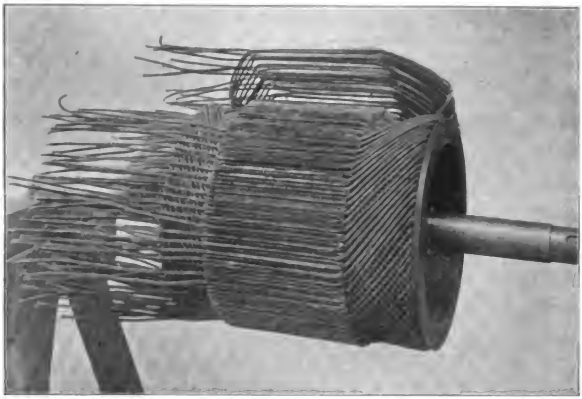
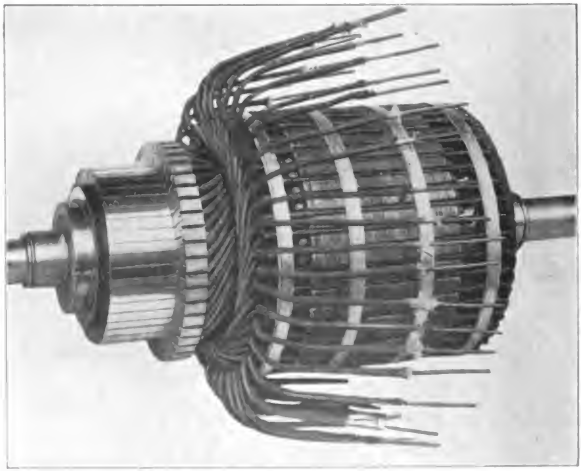


Fig. 162. Zusammensetzen der Schablonenwicklung eines Ankers der Gesellschaft für Elektr. Industrie, Karlsruhe i. B.



Eig. 163. Anker der Westinghouse El. and Mfg. Co., Pittsburg.

Digitized by Google

In Fig. 161a und 161b ist eine solche in zusammengesetztem und in zerlegtem Zustande mit einer Spule abgebildet. Sie besteht aus zwei Teilen. Der untere Teil wird drehbar gelagert, seine obere Begrenzung bilden zwei zylindrische Ebenen, die um den Betrag der Kröpfung der Spule gegeneinander versetzt sind. Der obere Teil ist auf den unteren aufgepaßt und am äußeren Umfange entsprechend dem Platzbedarf und der Form der Spule ausgearbeitet.

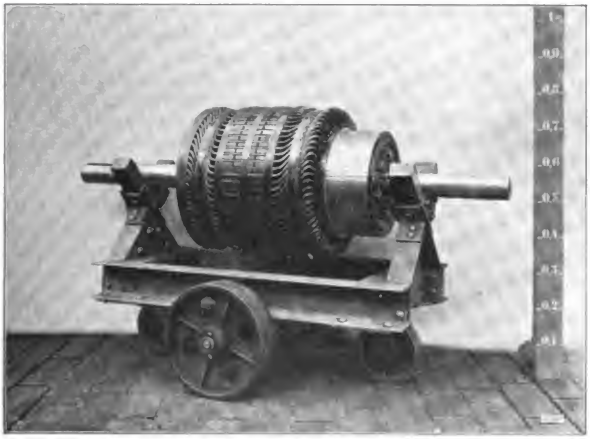


Fig. 164.

In Fig. 162 ist eine Wicklung, die aus derart hergestellten Spulen besteht, dargestellt. Der Anker ist vierpolig und erhält für 220 Volt 87 Spulen à 2 Windungen; je zwei Spulenseiten liegen in einer Nut des Ankers übereinander. Um die letzten Spulenseiten unten in die Nut einlegen zu können, müssen die oben liegenden Seiten der zuerst eingelegten Spulen herausgehoben werden.

Dieser Zustand des Wicklungsvorganges ist in Fig. 162 dargestellt.

Nachdem die letzte Spule eingelegt ist, können die abgehobenen Drähte in die betreffenden Nuten zurückgebogen werden.

Für Massenfabrikation kann die Wicklung mit zweiteiliger

Digitized by Google

Schablone derart eingerichtet werden, daß für das Auseinanderziehen und Zusammensetzen der Schablone ein Fußtritt des Arbeiters genügt; ferner wird der Antrieb der Wickelbank so ausgeführt, daß die Schablone nach jedem Fußtritt nur eine halbe Umdrehung macht, so daß der Arbeiter Zeit hat, den Draht an der Kröpfungsstelle zu biegen und die Schablone für eine weitere halbe Umdrehung wieder rasch einzurücken.

Von derart hergestellten Spulen können mehrere nach dem Wickeln vereinigt, gemeinsam isoliert und in eine gemeinsame Nut des Ankers eingelegt werden, ebenso wie in Fig. 142 gezeigt wurde.

In Fig. 163 ist noch ein Anker dargestellt, der deutlich erkennen läßt, wie die Verbindungen zum Kommutator ausgeführt werden; die eine Hälfte der Enden ist angeschlossen, während die andere noch frei ist. — Schließlich gibt Fig. 164 das Bild eines fertigen Ankers mit Drahtwicklung und zugleich die Konstruktion eines Ankertransportwagens für die Werkstätte.

24. Trommelanker mit Stabwicklung.

Die Drahtwicklungen sind nur so lange bequem auszuführen, als der Drahtquerschnitt gewisse Grenzen nicht überschreitet; diese

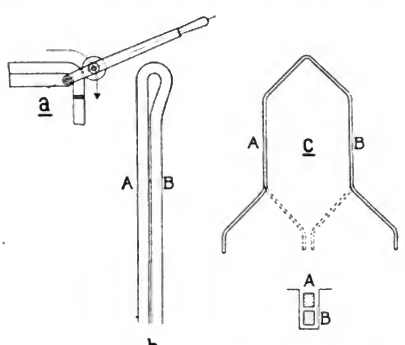


Fig. 165. Herstellung einer Windung ohne Lötstelle für eine Mantelwicklung.

Grenze hängt zum Teil auch von der Größe des Ankers ab. Die Stabwicklungen ermöglichen nicht allein eine bequeme Herstellung

Digitized by Google

der Wicklung für große Querschnitte, sondern zugleich eine Anordnung der Stäbe in getrennten Wicklungsebenen, daher eine vorzügliche Isolierung und ein leichteres Auswechseln schadhaft gewordener Teile; aus diesen Gründen haben sie sich allgemein eingebürgert.

Die Herstellungsart der Wicklung ist wesentlich vom Stabquerschnitt abhängig. Bei kleineren Stabquerschnitten kann eine ganze Windung aus einer Stablänge hergestellt werden, bei großen Stabquerschnitten ist es mit Rücksicht auf das bequemere Herstellen und Zusammensetzen der Wicklung oft zweckmäßig, eine Windung aus zwei oder mehr Teilen zusammenzulöten.

Wegen der günstigeren Abkühlungsverhältnisse und der leichteren Fabrikation wird die Mantelwicklung gegenüber der Stirnwicklung bevorzugt.

Fig. 165c stellt eine Windung einer Wellenwicklung und, mit den punktiert gezeichneten Abbiegungen, eine Windung einer Schleifenwicklung dar. Liegt der Stab A in der oberen und der Stab B (um den Schritt y_1 entfernt) in der unteren Hälfte der Nut, so können wir diese Windung wie folgt herstellen. Der Kupferstab wird zunächst mittelst einer einfachen, in Fig. 165a skizzierten Vorrichtung in kaltem Zustande in die Form Fig. 165b gebogen. Bei starken Kupferstäben darf diese Biegung nicht mit einemmal ausgeführt werden, sondern die Biegungsstelle ist nach der ersten Biegung auszuglühen, oder man biegt den Stab in warmem Zustande. — Alsdann werden die Schenkel A und B seitlich auseinandergezogen und mittelst Schablonen in die endgültige Form, Fig. 165c, gepreßt oder gehämmert.

Soll die Wicklung auf der einen Seite als Stirnwicklung ausgeführt werden, so ist der Stab in die Form Fig. 166 oder Fig. 167 zu biegen, oder in die Form Fig. 168, wenn die Stäbe auch auf der Kommutatorseite, nach den Stirnflächen des Ankers hin, abgebogen werden.

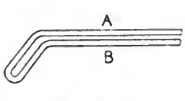


Fig. 166.

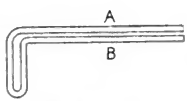


Fig. 167.

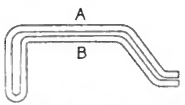


Fig. 168.

Fig. 166—168. Herstellung einer Windung ohne Lötstelle für Stirnwicklungen.

Im letzteren Falle lassen sich die Biegungen besser ausführen und die Wicklung leichter zusammensetzen, wenn eine Windung, wie Fig. 169 zeigt, aus zwei Teilen besteht.

Digitized by Google

Die Teile *A* und *B* sind in allen Fällen entsprechend den Wicklungsschritten seitlich auseinanderzubiegen.

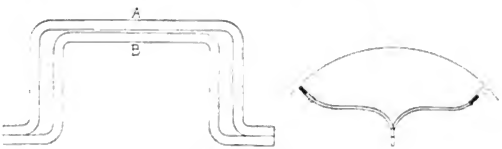


Fig. 169.

Bei Mantelwicklungen wird, namentlich bei großen Stabquerschnitten, eine Windung häufig aus zwei Stäben zusammengesetzt, wie in Fig. 170 für eine Schleifenwicklung dargestellt ist. Auf der hinteren Seite der Wicklung sind, ebenso wie auf der Kommutatorseite, je zwei Stäbe durch einen Kupferbügel zusammengehalten und miteinander verlötet.

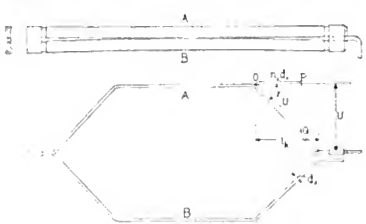


Fig. 170.

Ein Stab, der eine halbe Windung bildet, braucht für eine Wellenwicklung, wie Fig. 171 zeigt, nur auf der einen Seite abgebogen zu werden. Man ermöglicht damit das seitliche Einschieben in halb geschlossene Nuten, bei denen ein direktes Einlegen nicht möglich ist; die Länge l_k des Wicklungskopfes wird dagegen größer.

Die Länge l_k läßt sich wie folgt bestimmen. Bezeichnet d_s die Dicke eines Stabes mit Isolierung plus dem Spielraum zwischen zwei Stäben (Fig. 170), und n_s die Anzahl der Stäbe einer Lage auf der Strecke U, so ist

$$\cos\gamma = \frac{d_s n_s}{U}.$$

Mit diesem Winkel der Abbiegung kann unter Berücksichtigung der Länge der Lötstellen l_k erhalten werden.

Digitized by Google

Liegen die Stäbe in den Nuten nebeneinander, so kann man bei nicht zu großen Querschnitten der Leiter die Windung aus einem geraden Stück Kupferband in die verlangte Form falten und biegen.

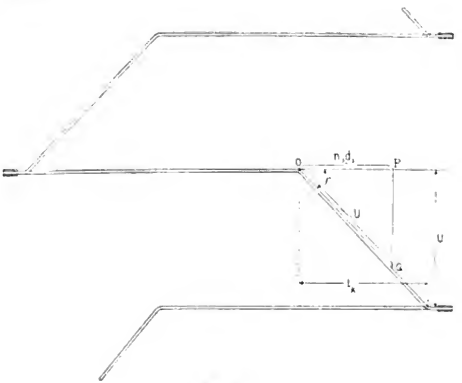


Fig. 171.

In Fig. 172 besteht jede Hälfte *A* und *B* einer Windung aus einem an den Enden rechtwinklig abgebogenen Kupferband; die Enden *d*, *e* sind in einen Schuh *c*, der aus Kupferblech gefaltet ist, eingelötet, und die auf der einen Seite liegenden Schuhe c_1 werden mit dem Kommutator verbunden.

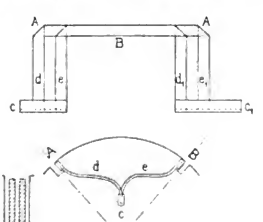


Fig. 172.

Es ist leicht möglich, daß für die Lötstellen in Fig. 172 mit dem Schuh *c* nicht genügend Platz vorhanden ist, in diesem Falle kann man sie nach dem Ankerumfange verlegen, wodurch die in Fig. 173 gezeichnete Herstellungsart entsteht. Eine Windung setzt sich jetzt aus einem langen Stab *A*, einem kurzen Stab *B*, der Verbindungsgabel *d*, *e* und den Verbindungslamellen d_1 und e_1 zum Kommutator zusammen. Will man die Lamellen d_1 und e_1 nicht direkt zum Kommutator führen, so erhält man auch auf dieser

Digitized by Google

Seite Verbindungsgabeln d'_1, e'_1, die mittelst des Lappens c_1 oder eines Drahtstückes mit dem Kommutator verbunden werden.

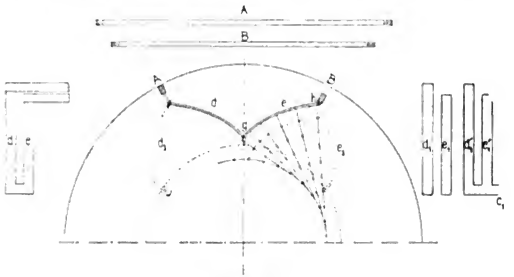


Fig. 173.

Die Verbindungsstücke d und e sind nach einer solchen Kurve zu biegen, daß die Verbindungsstücke der anderen Stäbe ebenfalls Platz finden und daß ihre Länge möglichst kurz wird; das wird am besten erreicht, wenn die Kurve g—h eine Evolvente ist, deren Grundkreis möglichst groß gewählt wird. Bei Nutenankern legt man am besten die kurzen Stäbe unten und die langen oben in die Nuten. — Diese Wicklungsart ist aber auch ausführbar für nebeneinanderliegende Stäbe, z. B. bei glatten Ankern, kurze und lange Stäbe wechseln dann am Ankerumfange miteinander ab. — Liegen die Stäbe in Nuten nebeneinander, so kann einer derselben, wie Fig. 174 zeigt, abgebogen

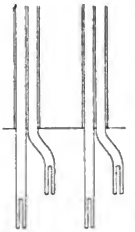


Fig. 174.

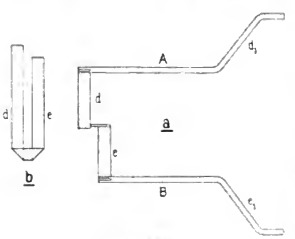


Fig. 175.

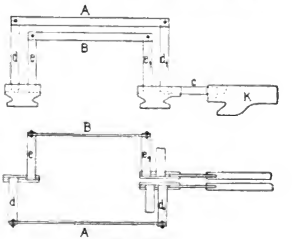


Fig. 176.

Digitized by Google

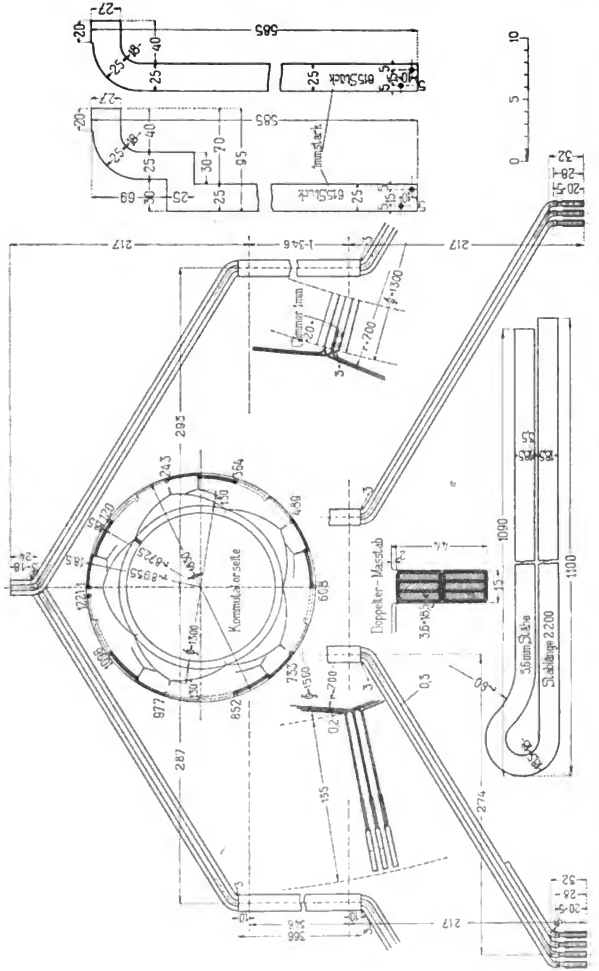


Fig. 177. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Stabwicklung einer Maschine für 400 KW bei 125 Umdrehungen.

Digitized by Google

werden, damit man für die Verbindung mit den Gabeln Platz gewinnt.

Ferner ist es möglich, die Gabelverbindungen nur auf einer Seite der Wicklung anzuwenden und auf der anderen Seite die Ankerstäbe selbst entsprechend dem Wicklungsschritte abzubiegen, wie Fig. 175 darstellt. Die Verbindungsgabel besteht hier aus einem Kupferband, das in die Form Fig. 175 b zusammengefaltet wird.

Schließlich sei noch eine Wicklung erwähnt, bei der eine Windung aus 8 Teilen besteht, wie in Fig. 176 gezeigt ist.

Die Kupferbänder d, e und d_1, e_1 sind einerseits mit den Ankerstäben und andererseits mit den Lamellen von sog. Hilfskollektoren verbunden. Diese Herstellungsart kommt nur bei großen Stabquerschnitten in Betracht. Die Hilfskollektoren dienen gleichzeitig zur Aufnahme der auf die rotierende Wicklung wirkenden zentrifugalen Kräfte.

Fig. 177 zeigt eine Werkstattzeichnung für eine Stabwicklung. Die Wicklung gehört zu der auf S. 172 beschriebenen Maschine für 400 KW bei 125 Touren der Compagnie Générale Electrique in Nancy. Die Wicklung ist eine Wellenwicklung mit sechs Stäben pro Nut. Ferner sind Äquipotentialverbindungen nach dem Schema Fig. 203, S. 113 angebracht. Jeder Knotenpunkt der Wicklung ist mit zwei Fahnen verbunden, welche nach zwei Kommutatorlamellen führen, die um den Potentialschritt auseinander liegen. Die beiden Fahnen müssen in zwei Ebenen angeordnet werden; sie sind in Fig. 177 auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt.

25. Befestigung der Wicklung.

Nachdem die Wicklung des Ankers fertiggestellt ist, muß sie gegen die Wirkungen der Zentrifugalkraft geschützt werden.

Hierzu verwendet man:

1. Drahtbänder,
2. Keile,
3. Blechbänder,
4. Metallkappen.

Drahtbänder werden hauptsächlich für kleine Anker mit offenen Nuten verwendet. Das Drahtband wird durch Aufwickeln eines über Rollen laufenden, stark angespannten Drahtes hergestellt. Nach dem Aufwickeln werden die Drähte eines Bandes untereinander verlötet. An der Stelle, wo das Drahtband zu liegen kommt, wird bei Nutenankern in den Eisenkern meistens eine Rille von etwa 2 mm Tiefe eingedreht.

Digitized by Google

In Fig. 178 ist ein einfaches und in Fig. 179 ein doppeltes Drahtband aufgezeichnet. Zwischen Wicklung und Drahtband besteht die volle Klemmenspannung. Als Isolation wird Preßspan und Leatheroid auf der inneren Seite lackiert oder mit Paraffin getränkt, Mikaleinen, Glimmer u. a. verwendet.

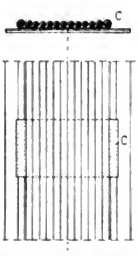


Fig. 178. Einfaches Drahtband.

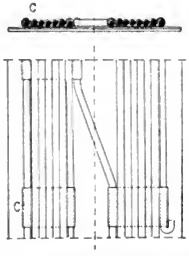


Fig. 179. Doppeltes Drahtband.

Preßspan oder Leatheroid genügen in zwei oder drei Lagen, bis zu 2,0 mm Stärke bei größeren Maschinen, für Spannungen bis 1000 und mehr Volt. Jedoch wird häufig bei 500 und mehr Volt Mikaleinen, Megohmit oder Naturglimmer in Vereinigung mit Preßspan verwendet.

Auf das so hergestellte Isolierband wird nun das Drahtband gewickelt. Hierzu wird Draht von hoher Zugfestigkeit, wie Messingdraht, Siliziumbronzedraht, Stahldraht usw. von 0,6 bis 1,6 mm Durchmesser benutzt.

Die Breite eines einfachen Drahtbandes, das im magnetischen Felde liegt, soll nicht über 20 mm oder besser nicht über 16 mm betragen, weil es sich sonst durch Wirbelströme stark erwärmen kann. Die Isolation soll auf jeder Seite des Bandes um 2 bis 3 mm vorstehen.

Die Drähte werden zweckmäßig an mehreren Stellen des Umfanges, etwa in Abständen von 20 bis 30 cm, durch Messingbleche c zusammengehalten und ringsum miteinander verlötet.

Die Berechnung der Drahtbänder ist im Abschnitt 71 gegeben.

Keile werden bei größeren Maschinen verwendet, sie bedingen halbgeschlossene oder offene eingekeilte Nuten. Für den über das Ankereisen vorstehenden Teil der Wicklung sind in diesem Fall noch Drahtbänder notwendig. Die Keile werden meistens aus Leatheroid, Fiber oder aus Hagenbuchen-, Ahorn- oder Pockholz hergestellt. Für größere Umfangsgeschwindigkeiten sind auch vom

Digitized by Google

Ankereisen isolierte Metallkeile (aus Bronze, Packfong u. a.) versucht worden, scheinen sich jedoch nicht bewährt zu haben.

Das Holz soll keine Äste, Knoten und sonstige Unregelmäßigkeiten haben und muß vor Benutzung im Vakuumofen getrocknet und noch heiß in zweimal gekochtes Leinöl getaucht werden. Um ein Verziehen der Keile zu verhindern, ist es zu empfehlen, sie aus mehreren Stücken verschiedener Faserrichtung zusammenzusetzen.

Blechbänder werden anstatt Drahtbänder für Anker mit großem Durchmesser verwendet. Wenn dieser etwa 200 bis 250 cm übersteigt, ist eine Befestigung der Drähte mittelst Drahtbänder nicht mehr gut möglich, weil das Band bei seiner großen Länge leicht locker wird. Außerdem ist es sehr zeitraubend, bei allfälligen Reparaturen an der Wicklung die Drahtbänder entfernen und wieder herstellen zu müssen. — In solchen Fällen können die Drähte in den Nuten durch Keile und außerhalb derselben durch geteilte, leicht abnehmbare und auflegbare Bänder aus Stahl- oder Messingblech gehalten werden.

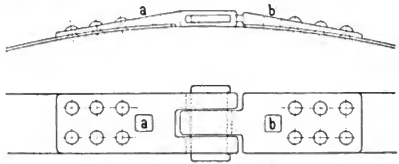


Fig. 180. Keilschloß für Blechbänder. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

Die Fig. 180 veranschaulicht eine Bandkonstruktion der Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Die Bandenden werden mittelst eines Keilschlosses zusammengehalten. Das Anspannen des

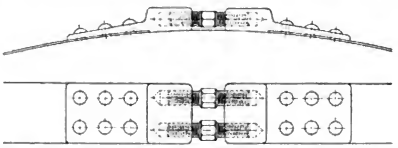


Fig. 181. Schraubenverbindung für Blechbänder. Maschinenfabrik Oerlikon.

Bandes erfolgt durch eine Zange mit großer Hebelübersetzung, welche in die Vertiefungen *a* und *b* des Keilschlosses eingreift. An Stelle des Keiles können links- und rechtsgängig Schrauben treten, wie Fig. 181 zeigt.

Digitized by Google

Bemerkenswert ist die Art, wie die Maschinenfabrik Oerlikon bei den großen Ankern von 460 cm Durchmesser und 40 cm Eisenlänge der Gleichstrommaschinen des Elektrizitätswerkes Rheinfelden die Drähte ohne Anwendung von Keilen in den Nuten befestigt hat. In das Ankereisen sind drei Scheiben aus Kupferblech eingelegt, deren Zacken K, wie Fig. 182 zeigt, zunächst über die Zähne des Ankers vorstehen. Über die Zacken werden Fiberleisten mit entsprechenden Öffnungen geschoben und die Zacken des Kupferbleches nun abwechselnd nach rechts (K_1) und nach links (K_2) abgebogen.

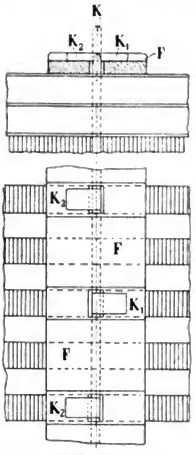


Fig. 182.

Ferner können bei Stirnwicklungen zur Befestigung der Wicklung sog. Hilfskollektoren, wie in Fig. 202, angewandt werden.

Metallkappen. Um bei den hohen Umfangsgeschwindigkeiten, wie sie bei Turbogeneratoren vorkommen, die Spulenköpfe der Wicklung gegen die Wirkung der Fliehkraft zu schützen, werden übergeschobene Zylinder aus Bronze verwendet. Es ist wichtig, die Verbindungen so festzupressen, daß ein Arbeiten der Wicklung ausgeschlossen ist. Dies kann erreicht werden, indem man die Kappen innen ein wenig konisch ausbildet, so daß beim Aufschieben in der Achsenrichtung die Wicklung festgelegt wird. Um einem Ausbiegen der Kappen vorzubeugen und um sie sicher zu zentrieren, ist es zu empfehlen, sie an ihren äußeren Enden mit dem Ankerstern oder der Welle zu verbinden (s. Tafel VII).

26. Die Verbindung der Ankerdrähte mit dem Kommutator.

Die Ankerdrähte werden mit den Kommutatorlamellen entweder verschraubt, vernietet oder verlötet. Die Verschraubung hat den Vorzug, daß ein Lösen der Drähte einfacher und rascher auszuführen ist; dagegen gibt das Einlöten der Drähte einen besseren Kontakt, und die Herstellung der Schrauben und Schraubengewinde kommt in Wegfall. Im allgemeinen ist dem Verlöten oder Vernieten der Vorzug zu geben.

Bei dünndrähtigen Wicklungen wird gewöhnlich das Ende der

Digitized by Google

einen und der Anfang der folgenden Spule zum Kommutator geführt, wie Fig. 183 zeigt, in diesem Falle sind also je zwei Drähte

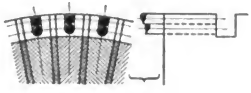


Fig. 183.

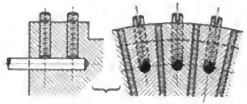


Fig. 184.

mit einer Lamelle zu verbinden. Bei Stabwicklungen wird dagegen der Knotenpunkt mit einem einfachen Drahte an den Kommutator angeschlossen und die Verbindungsdrähte sind nur so lange stromführend, als die betreffende Lamelle mit einer Bürste in Verbindung steht. Der Querschnitt dieser Verbindungsdrähte kann daher kleiner sein, als derjenige der Ankerdrähte, und wird, um den Widerstand des Kurzschlußstromkreises zu erhöhen, öfters aus Nickelin, Kruppin usw. hergestellt.

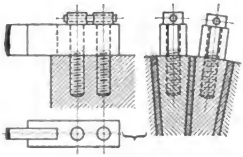


Fig. 185.

In den Fig. 186 und 187 sind verschiedene Verbindungsarten einzelner Drähte mit dem Kommutator dargestellt, ebenso in den

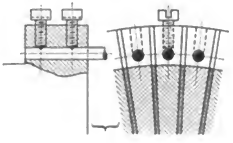


Fig. 186.

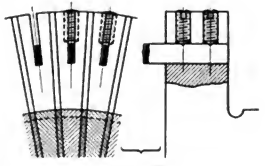


Fig. 187.

Fig. 188 bis 193. Die letzteren zeigen zugleich, wie die Stäbe der Wicklung gefaßt werden. Es wird um die Stabenden entweder eine Schleife aus Kupferband oder nach einer Konstruktion von Brown, Boveri & Co., Fig. 191, ein Drahtband gelegt, und mit den Stäben und dem Draht, der zum Kommutator führt, verlötet. Damit die Lötstellen durch die Erschütterungen der Maschine weniger leiden, werden oft, wie Fig. 188a zeigt, die Verbinder in der Mitte etwas abgebogen oder gekröpft oder aus Kabel hergestellt.

Digitized by Google

In Fig. 193 ist auch gezeigt, wie bei einem Anker, dessen Durchmesser bedeutend größer ist als derjenige des Kommutators, die

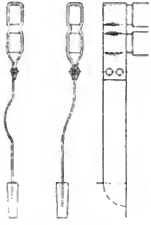


Fig. 188a.

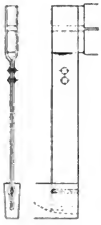


Fig. 188b.

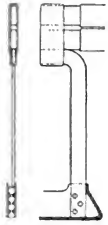


Fig. 189.

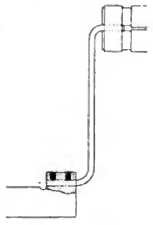


Fig. 190.

Fig. 191.

Mantelwicklung mit den Lamellen verbunden wird. Mittelst zweier schmiedeeiserner Ringe *A* und Isolierzwischenlagen *B* werden die Verbindungsdrähte zwischen Wicklung und Kommutator nochmals befestigt.

Andere Verbindungsarten sind im Zusammenhange mit Ankerkonstruktionen dargestellt.

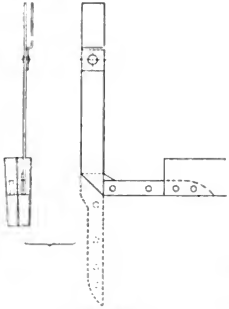


Fig. 192.

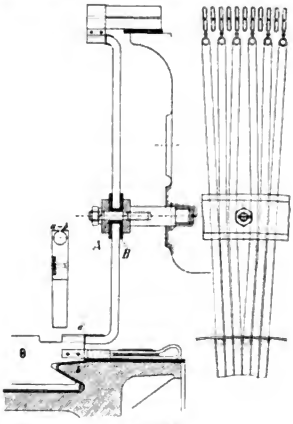


Fig. 193.

Digitized by Google

27. Anordnung der Äquipotentialverbindungen.

Die Vorzüge der Äquipotentialverbindungen wurden ausführlich in Bd. I im zehnten Kapitel, erörtert, wir wollen uns hier auf die konstruktive Ausführung beschränken.

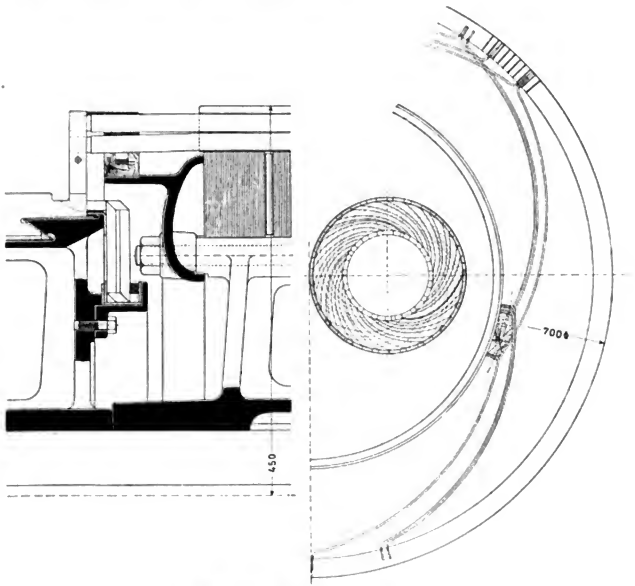


Fig. 194. A.-G. Volta, Reval.

Fig. 194 veranschaulicht eine Konstruktion der A.-G. Volta, Reval.

Die Verbindungen sind aus gebogenem Kupferband und liegen hinter dem Kommutator.

In Fig. 195 bestehen die Verbindungen *A* ebenfalls aus Kupfergabeln, die mittelst Drahtstücke an den Kommutator angeschlossen sind.

Bequem herstellbar sind die Ausgleichverbindungen mit Drähten, die in zwei Ebenen angeordnet werden. Die Drähte *A* liegen

Digitized by Google

dann gewöhnlich, wie Fig. 196 zeigt, auf dem Umfange der Kommutatorbüchse.

Wenn der Potentialschritt groß ist, oder wenn ungleiche Potentialschritte vorkommen, ist es besser, sog. Ausgleichringe anzuordnen. Da die Zahl der Lamellen, die ein gleiches Potential haben, allgemein gleich der halben Anzahl der Ankerstromzweige a ist, so ist jeder Ring mit a Lamellen oder a Stellen der Wicklung zu verbinden. Es können z. B. die Drahtbänder, welche die Wicklung zusammenhalten, zugleich als Ausgleichringe benutzt werden.

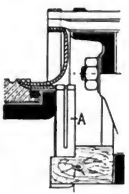


Fig. 195.

In der Fig. 197 ist gezeigt, wie solche Ringe R hinter dem Kommutator, und in Fig. 198, wie sie auf der hinteren Seite des Ankers angeordnet werden können.

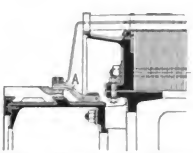


Fig. 196. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

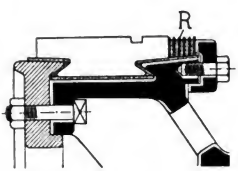


Fig. 197.

Fig. 200 stellt das Bild eines Ankers der E.-A.-G. vorm. Kolben & Co. dar, bei welchem die zehn Ausgleichringe, ähnlich wie

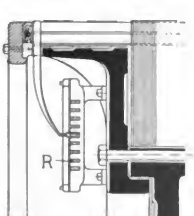


Fig. 198.

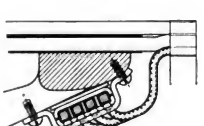


Fig. 199. Compagnie Générale Electrique, Nancy.

in Fig. 198, auf der hinteren Ankerseite angebracht sind. — Einen Anker mit 16-poliger Parallelwicklung, 1000 KW, 500 Volt, 90 Um-

Digitized by Google

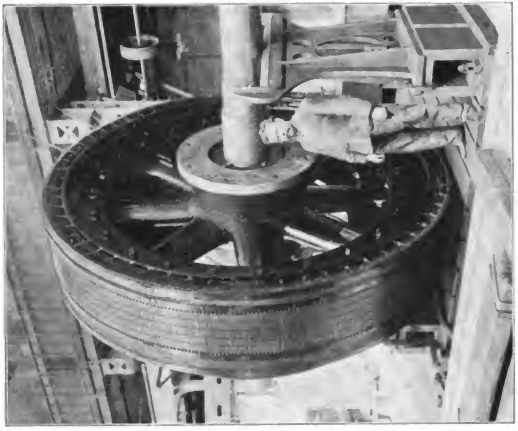


Fig. 201.

Fig. 200. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co., Prag.

Digitized by Google

drehungen und 8 Ausgleichringen von ca. 52 mm² Querschnitt veranschaulicht Fig. 201.

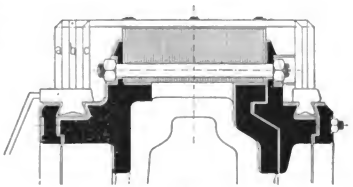


Fig. 202.

Werden alle Lamellen an Ausgleichverbindungen angeschlossen, wie das in Fig. 166, Bd. I, S. 175, dargestellt ist, so ergibt sich nach Ausführungen der Maschinenfabrik Oerlikon die Stabwicklung, Fig. 202, mit drei Verbindungen (a, b, c) zu jeder Lamelle.

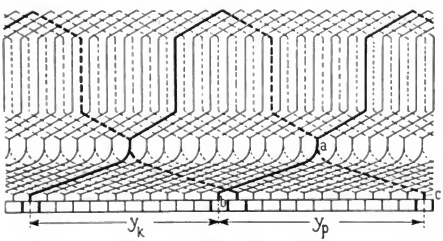


Fig. 203.

Eine schöne Wicklung ergibt sich ferner nach dem Schema Fig. 203, indem man jeden Knotenpunkt (a) der Mantelwicklung in Fig. 204 mit zwei Lamellen (b und c), die um den Potentialschritt y_p voneinander entfernt sind, verbindet.

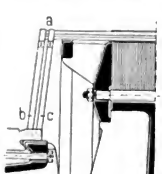


Fig. 204.

Der Kupferverbrauch wird durch die größere Zahl der Verbindungen natürlich erhöht.

Das genaue Schema eines derartig ausgeführten Ausgleichsystemes findet man in Fig. 177, S. 103. Dieses Schema entspricht einer Ausführung der Compagnie Générale Electrique, Nancy.

28. Querschnitt und Anzahl der Äquipotentialverbindungen.

Im Abschnitt 52, Bd. I, S. 212, der Zahl, Stromstärke und Wattverlust der Äquipotentialverbindungen behandelt, wird gezeigt, daß der Widerstand einer Äquipotentialverbindung, wenn möglich,

Digitized by Google

nicht größer gewählt werden soll als der konstante Teil $2 \cdot \frac{R_w}{F_u}$ der Bürstenübergangswiderstände, wenn F_u die Fläche eines Bürstensatzes und (siehe Bd. I, S. 351)

$$R_w = R_k - \frac{e_u}{s_{ux}} \quad \text{ist.}$$

Ist z. B. für Kohlenbürsten $e_u = 0{,}2$, $s_{ux} = 6$, $R_k = 0{,}14$, so wird $R_w = 0{,}1\ \Omega$ und der Widerstand einer Verbindung soll dann kleiner als $\frac{0{,}2}{F_u}\ \Omega$ sein.

Für Kupferbürsten ist der Wert des spezifischen Widerstandes R_w ca. $^1/_{10}$ von dem der Kohlenbürsten; der Widerstand einer Verbindung ist daher kleiner als $\frac{0{,}02}{F_u}$ Ohm zu wählen. Der Wattverlust für den Ausgleich wird jedoch um so kleiner, je größer der Widerstand einer Verbindung ist. Man wird daher bei Wellenwicklungen den Querschnitt um so knapper halten, je größer der Fehler $\alpha_u{}^0$ (S. 194, Bd. I) ist.

Die Zahl der Lamellen oder Knotenpunkte der Wicklung, welche an Ausgleichsleitungen anzuschließen sind, darf um so kleiner sein, je mehr Sorgfalt auf eine symmetrische Ausführung der Maschine gelegt wird.

Bei Schleifenwicklungen genügt es, wenn $^1/_8$ bis $^1/_{36}$ aller Lamellen mit Ausgleichverbindungen verbunden werden. Man wird fast in allen Fällen mit etwa 4 bis 12 Ausgleichringen, von denen jeder an p Lamellen angeschlossen ist, d. h. mit einem 4 bis 12phasigen Ausgleich, auskommen. Der Querschnitt des Ringes beträgt bei 120 bis 750 Volt-Maschinen bis 30 und 60 mm².

Bei Wellenwicklungen genügt es, wenn $^1/_4$ bis $^1/_{16}$ aller Lamellen oder Knotenpunkte angeschlossen wird. Schließt man jede a-te Lamelle an, so entstehen infolge der Unsymmetrie der verschiedenen Pole keine Ausgleichströme, während die günstige Wirkung der Äquipotentialverbindungen auf die Kommutation erhalten bleibt.

In einigen Fällen, z. B. mit Rücksicht auf die Ausbalancierung des Ankers bei Turbogeneratoren, ist es erwünscht, den durch ungleiche Feldstärken hervorgerufenen einseitigen magnetischen Zug zu beseitigen. In diesem Fall sind die Verbindungen in größerer Anzahl auszuführen. Ein Querschnitt der Verbinder von 7 bis 12 mm² (3 bis 4 mm Drahtdurchmesser) hat sich bei vielen Ausführungen bewährt.

Digitized by Google

Siebentes Kapitel.

Magnetgestell und Magnetwicklung.

29. Material der Feldmagnete. — 30. Befestigung des Polschuhes an dem Magnetkern und des Magnetkernes an dem Joch. Jochquerschnitte. — 31. Material und Form der Wendepole und Wendepolwicklungen. — 32. Spulenkasten und Magnetspulen. — 33. Anordnung der Doppelschlußwicklung.

29. Material der Feldmagnete.

Die hauptsächlichsten Formen und Anordnungen der Feldmagnete sind im vierundzwanzigsten Kapitel, Band I, besprochen worden. Im heutigen Dynamobau kommt fast ausschließlich die Radialpoltype zur Verwendung. Das Feldsystem einer solcher Type besteht aus den Polschuhen, den Magnetkernen und den Jochverbindungen. Als Material für diese Teile wird weicher Stahlguß, Flußeisen, Schmiedeeisen, Eisenblech und Gußeisen verwendet.

Für die Wahl des Materials sind die magnetischen und elektrischen Eigenschaften desselben, die Herstellungskosten und das Gewicht der Maschine und oft noch andere Punkte, wie Lieferzeit usf. maßgebend.

Die magnetische Sättigungsgrenze liegt für Schmiedeeisen, weichen Stahlguß und Flußeisen etwa doppelt so hoch wie für Gußeisen; die ersteren ergeben daher bei gleichem Kraftfluß ungefähr halb so große Querschnitte. Um an Erregerkupfer zu sparen, wird daher für die Magnetkerne selten Gußeisen, sondern fast immer Stahlguß, Flußeisen, Schmiedeeisen oder Eisenblech, die wir als Weicheisen bezeichnen wollen, verwendet. Magnetkerne aus Weicheisen werden häufig mit dem Polschuh aus einem Stück gegossen oder in Gesenken geschmiedet, damit der Polkern möglichst homogen wird und keine Nacharbeit erfordert.

Der kreisförmige Querschnitt ist für die Magnetkerne der günstigste, weil er die kleinste Windungslänge für die Magnetwicklung ergibt. Die Blechpole haben den Nachteil, daß sie für runden Querschnitt ungeeignet sind, dagegen erhalten wir damit gleich-

Digitized by Google

zeitig lamellierte Polschuhe; bei kleineren Maschinen mit weiten Nuten sind daher lamellierte Pole sehr beliebt.

Große Magnetkerne werden meistens massiv gemacht mit rundem Querschnitt, und wenn der Polschuh lamelliert sein soll, wird er für sich aus Eisenblech hergestellt. Wegen der geringen Permeabilität und der kleineren Leitfähigkeit für Wirbelströme werden auch auf Weicheisenpole gußeiserne Polschuhe aufgeschraubt.

Die verschiedene Form der Magnetisierungskurve von Weicheisen und Gußeisen kommt oft bei der Wahl des Materials für das Joch in Betracht. Für eine Nebenschlußmaschine, die mit sehr verschiedenen Klemmenspannungen arbeiten, z. B. beleuchten und Akkumulatoren laden soll, ist es günstig, das Joch aus Gußeisen herzustellen, weil die Leerlaufcharakteristik dann allmählicher abbiegt als bei einem Weicheisenjoch. In letzterem Falle gelangt man vor dem Knie der Leerlaufcharakteristik bald zu wenig stabilen Betriebsverhältnissen. In allen solchen und ähnlichen Fällen ist es zweckmäßig, auf den verschiedenen Charakter der Magnetisierungskurven der Materialien Rücksicht zu nehmen.

Bei Maschinen mit großem Durchmesser, bei welchen ein Weicheisenjoch zu wenig Festigkeit besitzt und sich durchbiegen wird, ergibt der größere Querschnitt eines gußeisernen Joches auch größere Steifigkeit und zugleich ein besseres Aussehen der Maschine.

Wenn man außerdem beachtet, daß das Gußeisen dem Konstrukteur größere Freiheit in der Formgebung gestattet, daß es leichter und rascher zu beschaffen und zu bearbeiten ist, so ist erklärlich, daß das Joch noch vielfach aus Gußeisen hergestellt wird.

Zu beachten ist, daß das Gußeisen infolge seiner größeren Koercitivkraft mehr Zeit zur Magnetisierung und Entmagnetisierung verbraucht als Weicheisen; wo ein rasches Anlaufen oder Ummagnetisieren nötig ist, wäre daher Gußeisen zu vermeiden.

Bei Maschinen mit Kompoundwicklung und rasch wechselnden Belastungen, wie sie z. B. im Bahnbetrieb vorkommen, ist die magnetische Trägheit der Kompoundierung hinderlich, und bei Maschinen mit großen Eisenmassen wird das Magnetfeld der rasch wechselnden magnetisierenden Kraft nur in sehr geringem Maße folgen. Vollständig lamellierte Pole und Weicheisenjoch sind in solchen Fällen vorzuziehen.

In einzelnen Fällen wird das Magnetgestell ganz aus Blechen zusammengebaut. Dies geschieht z. B. bei den kompensierten Maschinen System Déri und bei den Motoren der Johnson-Lundell Electric Traction Company [1]), welche letztere ausgeprägte lamellierte Pole haben.

[1]) Siehe H. M. Hobart, Motoren für Gleich- und Drehstrom.

Digitized by Google

30. Befestigung des Polschuhes an dem Magnetkern und des Magnetkernes an dem Joch. Jochquerschnitte.

Verschiedene Formen der Magnetkerne und der Polschuhe, wie sie zur Erreichung eines günstigen kommutierenden Feldes und einer kleinen Quermagnetisierung zu entwerfen sind, sind auf

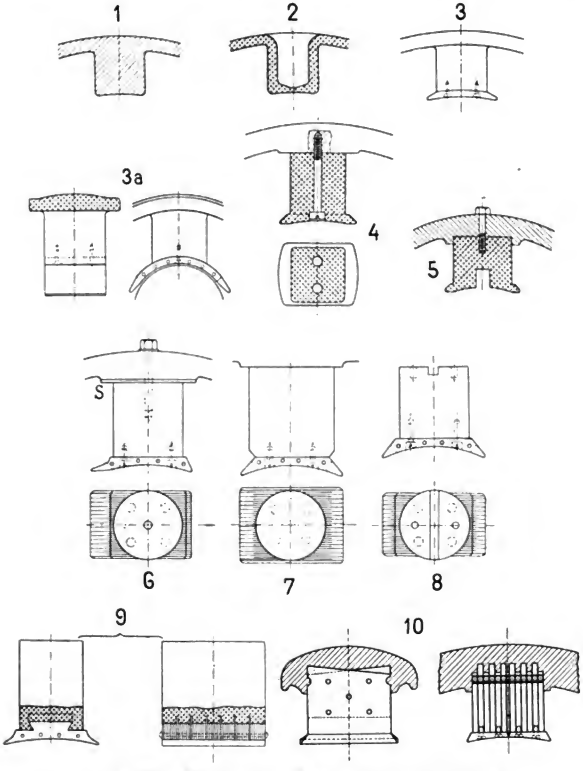


Fig. 205. Nr. 1 bis 10. Magnetkerne und Polschuhe.

Digitized by Google

Seite 532, Bd. I. ausführlich besprochen worden. Verschiedene konstruktive Ausführungen sind in Fig. 205 Nr. 1 bis 15 dargestellt.

In Nr. 1 und 2 ist kein Polschuh vorhanden, Magnetkern und Joch sind zusammengegossen; der Stahlgußpol Nr. 2 kann eine Höhlung erhalten.

In Nr. 3 und 3a bestehen Joch und Magnetkern aus Stahlguß, und der Polschuh, massiv oder lamelliert, wird aufgeschraubt.

Sofern das Joch und die Magnetkerne in einem Stück gegossen werden, bilden sich in den massiven Kernen leicht Blasen. Es ist daher besser, die Magnetkerne entweder mit oder ohne Polschuh besonders zu gießen oder aus Weicheisen zu schmieden. In Nr. 4 bis 8 sind solche Konstruktionen dargestellt. — Besteht das Joch

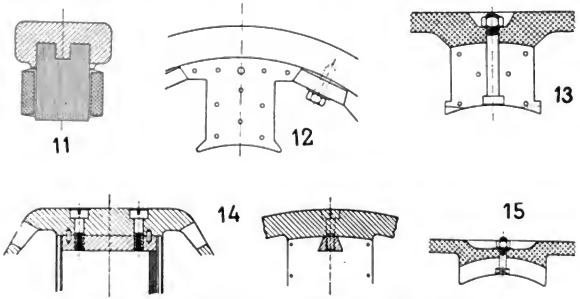


Fig. 205. Nr. 11 bis 15. Magnetkerne und Polschuhe.

aus Gußeisen und sind die Weicheisenkerne stark gesättigt, so ist es gut, den Übergangsquerschnitt vom Kerne zum Joch zu vergrößern; das kann geschehen, indem man den Fuß des Magnetkernes wie in Nr. 5 in eine Vertiefung des Joches einläßt oder eine schmiedeeiserne Platte S von 5 bis 10 mm Stärke zwischen Magnetkern und Joch einlegt, wie in Nr. 6.

Bei großen Luftinduktionen wird der Kerndurchmesser oft so groß, daß der Polschuh nur richtig ausgebildet werden kann, wenn eine Einschnürung des Querschnittes, wie in Nr. 7, vorgenommen wird. In Fig. Nr. 7 und 8 sind die lamellierten Polschuhe aufgeschraubt, und an den Polspitzen ist die Hälfte der Bleche abgeschnitten.

Der Magnetkern und der lamellierte Polschuh lassen sich auch durch das Gießverfahren vereinigen, indem man das mit Schwalbenschwanz (Nr. 9) versehene Blechpaket in die Gußform einlegt.

Digitized by Google

Dasselbe Verfahren wird auch angewandt, um die Blechpole mit dem Joch zu verbinden. Dieses Verfahren wird in letzter Zeit vielfach in Amerika angewandt. Die Nrn. 10 und 11 veranschaulichen einige derartige Ausführungen.

Die Figuren Nr. 13 bis 15 zeigen noch einige andere gebräuchliche Arten der Befestigung von lamellierten Polen.

Jochquerschnitte. (Fig. 206 Nr. 1 bis 15.) Die Formen 1 bis 3 eignen sich bei kleineren Maschinen mit offener Bauart sowohl für Gußeisen als Weicheisen. Um bei größeren Maschinen und kleinen Jochquerschnitten, die man für Weicheisen erhält, die nötige Steifigkeit zu erlangen, wählt man Querschnittsformen ähnlich den Nr. 7 und 8, während die Querschnitte Nr. 10 bis 15 für die gußeisernen Joche von größeren Maschinen bestimmt sind.

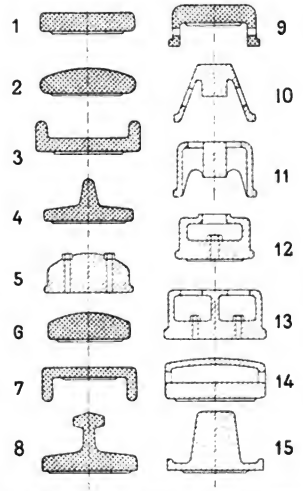


Fig. 206. Nr. 1—15. Jochquerschnitte.

31. Material und Form der Wendepole und Wendepolwicklungen.

Die Wendepole werden ebenso wie die Hauptpole aus Stahlguß, Schmiedeeisen oder Blech ausgeführt. Gußeisen kommt wegen seiner größeren Raumbeanspruchung kaum in Betracht.

Fig. 207 zeigt eine gebräuchliche und einfache Anordnung eines Wendepoles mit Wicklung (Maschinenfabrik Oerlikon).

Bei Maschinen gedrängter Bauart bietet die Unterbringung der Wendepolwicklung Schwierigkeiten. In schöner Weise ist die Schwierigkeit bei den Motoren der Rheinuferbahn[1]) (Siemens-Schuckert-Werke) gelöst. Bei diesen ist, wie Fig. 208 zeigt, der Raum zwischen Anker und Joch fast vollständig ausgenützt.

[1]) ETZ 1906, S. 316.

Digitized by Google

Eine ähnliche Anordnung für große Maschinen zeigt Fig. 209, die von den Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerken ausgeführt wird. Die Wendepolwicklung ist ganz an den Anker herangerückt, dadurch wird die Streuung der Wendepole verkleinert und das Ankerfeld außerhalb der neutralen Zone teilweise kompensiert. Die Wicklung besteht aus Flachkupfer. Die Wicklung der Hauptpole liegt

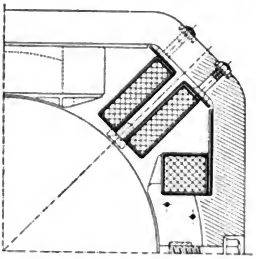


Fig. 207. Wendepol der Maschinenfabrik Oerlikon.

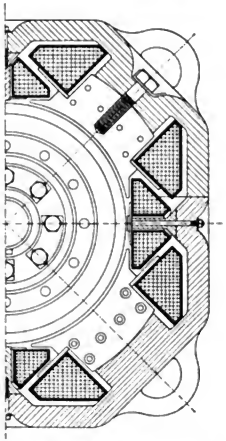


Fig. 208. Wendepolanordnung der Siemens-Schuckertwerke.

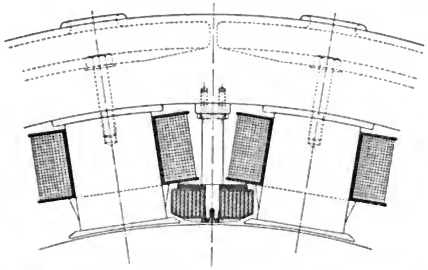


Fig. 209. Wendepolanordnung der Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

über der Wendepolwicklung, wodurch eine Verlängerung der Magnetschenkel bedingt ist.

Um an Wicklungsraum zu sparen und eine gute Kühlung des

Digitized by Google

Kupfers zu erreichen, ist es zweckmäßig, die Wicklungen für größere Stromstärken aus blankem Kupfer herzustellen. Fig. 210a zeigt

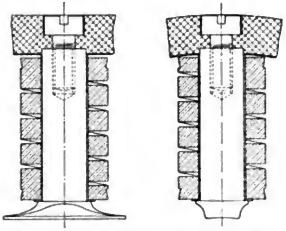


Fig. 210a. Wendepolwicklung für große Stromstärken.

einen Wendepol mit rundem Kern; die Wicklung ist aus einem Bronzezylinder durch Einfräsen eines Gewindeganges entstanden.

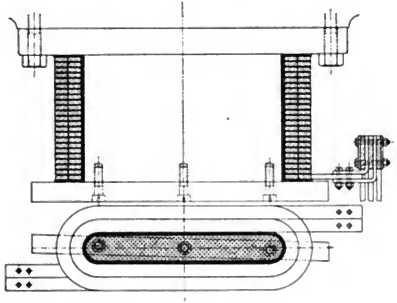


Fig. 210b.

In Fig. 210b besteht die Wicklung aus zwei Lagen und der Polschuh ist etwas schräg gestellt.

Die Morris-Hawkins Electric Co. ordnet zur besseren Unterbringung der Wicklung die Wendepole, wie Fig. 211 zeigt, seitlich vom Joch an. Diese Anordnung hat den Nachteil, daß die Streuung groß wird.

Fig. 212 zeigt eine Anordnung mit besonderem Joch (Siemens Bros., London). Es sind hier zwei Joche seitlich von den Magneten

Digitized by Google

angeordnet. Man gewinnt hierdurch den Vorteil, daß die Sättigung des Joches der Wendepole unabhängig von der Sättigung des Joches der Hauptpole ist, so daß für die Magnetisierungskurve der Wendepole die (nach Fig. 444, Bd. I) verlangte Gerade für alle Erregungen der Hauptpole erhalten werden kann.

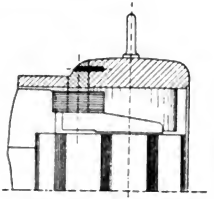


Fig. 211. Wendepolanordnung der Morris-Hawkins Electric Co.

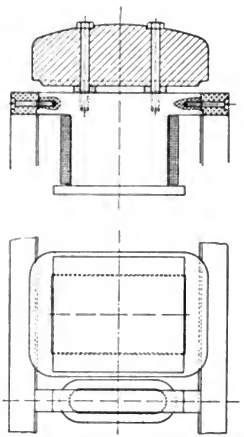


Fig. 212. Wendepole mit besonderem Joch. Siemens Bros., London.

32. Spulenkasten und Magnetspulen.

Die Feldwicklung wird meistens in sog. Spulenkasten, welche auf die Magnetkerne aufgepaßt werden, gewickelt. Diese Kasten bestehen entweder aus Isolierstoff (imprägniertem und lackiertem Papier oder Preßspan, gehärtetem Asbest, Pecolit, Isolit, Adit) oder aus Metall (Zinkblech, Eisenblech, Messingblech, Messingguß, Gußeisen), das mit Isolierstoff bekleidet wird. Vielfach werden jedoch die Spulen ohne Kasten hergestellt, mit Band oder Schnur umwickelt und gut isoliert auf den Magnetkernen befestigt.

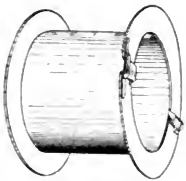


Fig. 213. Spulenkasten aus Isolit.

Da das Baumwollband die Wärme schlecht fortleitet, so ist es, wenn die Spannung nicht zu hoch ist, zu empfehlen, die Wicklung nur an einigen Stellen mit Schnur zusammenzubinden und die Drähte weiter nicht zu umwickeln.

Fig. 213 gibt das Bild eines Spulenkastens aus Isolit. Der An-

Digitized by Google

fang der am inneren Umfange beginnenden Wicklung wird durch einen Kanal am Flansche des Kastens nach außen geführt.

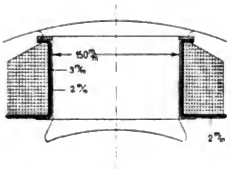


Fig. 214.

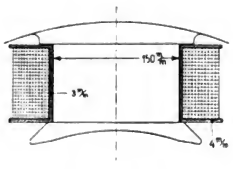


Fig. 215.

Zwei Kasten aus Zinkblech zeigen die Figuren 214 und 215, während der Kasten Fig. 216 Stirnplatten aus Messingguß besitzt, mit denen ein Rohr oder Zylinder aus Eisenblech von 1 mm Stärke vernietet wird.

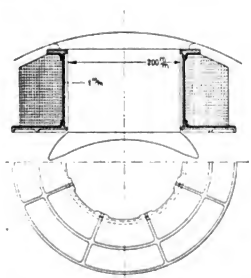


Fig. 216. A.-G. Volta, Reval.

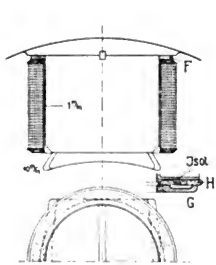


Fig. 217. Union E.-G., Berlin.

Um das Aufpassen der Spulen auf den Kern zu erleichtern, stehen an den Endplatten am inneren Umfange nur einzelne Ansätze vor.

Der Spulenkasten Fig. 217 ist ähnlich gebaut. Die Stirnplatten *G* bestehen aus schmiedbarem Guß und sind mit einem Blechzylinder von 1 mm Stärke vernietet. *H* bezeichnet einen Holzring und *F* einen Ring aus Filz, der zwischen Spule und Joch eingelegt wird.

Zur Isolierung werden die Spulenkasten mit Papier, Preßspan, Baumwolltuch, Segeltuch, Mikaleinen usw. bekleidet.

Digitized by Google

Die Stärke der Isolation richtet sich nach der Spannung des Erregerstromes; sie soll mit genügender Höhe über die äußerste Drahtlage vorstehen. Sie wird aus mehreren Lagen hergestellt, und die einzelnen Lagen der Stirnseiten und des Zylinders sollen sich überlappen. Als Beispiel ist in Fig. 218 die Isolation einer

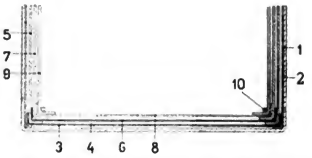


Fig. 218. Spulenkasten aus Zinkblech für 500—700 Volt isoliert.

1. Zinkblechgehäuse 1,2 mm.
2. Segeltuch 0,65 mm.
3. Segeltuch 0,65 mm.
4. 2 × geölte Baumwolle 0,17 mm.
5. Preßspan, geölt 1,0 mm.
6. 3 × Papier à 0,2 mm.
7. Preßspan, geölt 1,0 mm.
8. Segeltuch 0,65 mm.
9. Preßspan, geölt 0,65 mm.
10. Hanfschnur 1,5 mm.

Spule für 500 bis 700 Volt dargestellt. Die Gesamtstärke der Isolation erreicht in diesem Falle 3 bis 4 mm. In den Ecken ist je eine Windung aus Hanfschnur von der Stärke eines Drahtdurchmessers eingelegt. Für Spannungen bis 220 Volt genügt eine Isolationsstärke von 1 bis 2 mm.

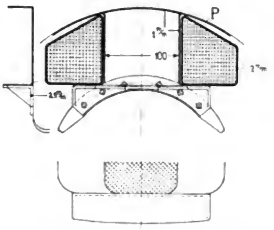


Fig. 219. A.-G. Volta, Reval.

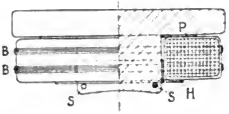


Fig. 220.

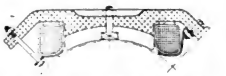


Fig. 221. Erregerspule für Bahnmotor. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.

Feldspulen ohne besondere Spulenkasten stellen die Fig. 219 bis 221 dar. In Fig. 219 wird die Spule gleichzeitig mit dem Polschuh festgehalten.

In Fig. 220 bezeichnet *H* eine Hülse aus Messingblech, *P* eine

Digitized by Google

Preßspanschicht, *B* Schnurbänder und *S* eiserne Stifte, die in den Pol eingeschraubt sind, um die Spule festzuhalten.

Fig. 221 veranschaulicht, wie die Spulen vom Joche aus festgehalten werden.

Magnetspulen mit Lüftung veranschaulichen die Fig. 222 und 223. In Fig. 222 sind in halber Tiefe der Wicklung Streifen aus Preßspan eingewickelt, zwischen denen Luftkanäle frei bleiben. Die Endplatten erhalten für den Luftzutritt entsprechende Aussparungen.

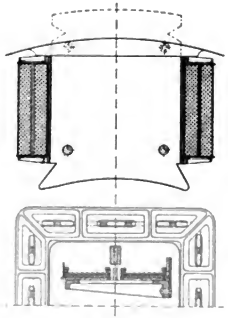


Fig. 222.

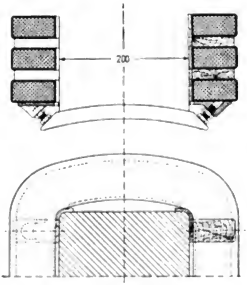


Fig. 223. A. E. G., Berlin.

Eine andere Art der Lüftung zeigt die Konstruktion der A. E.-G., Berlin, Fig. 223. Um die Kühlfläche der Spule zu vergrößern, ist sie aus drei getrennten Teilen hergestellt, die durch Holzleisten vom Kerne und unter sich isoliert sind. Zwischen den Holzleisten kann die Luft längs des Polkernes auf allen vier Seiten frei durchströmen. Um den Querschnitt für die Luft zu vergrößern, ist die Spule auf den äußeren Seiten leicht gewölbt.

Fig. 224. Stromableitungen aus Magnetspulen.

Der für die Magnetwicklung verwendete Draht ist ein- oder zweimal besponnen. Einfach besponnener Draht ist zulässig, wenn jede Wicklungslage noch einen Lackanstrich erhält.

Anfang und Ende der Wicklung werden gewöhnlich, wie Fig. 224 zeigt, durch ein Kupferblech oder in ähnlicher Art gefaßt. Das

Digitized by Google

Blech wird gut isoliert in die Wicklung eingebettet und am äußeren Ende mit einer Öse versehen, in welche der Verbindungsdraht, der zur benachbarten Spule führt, eingelötet wird.

Die Spulen ohne besondere Kasten werden mit Papier, Baumwollband, Leinwand, Schnur usw. umkleidet; bei den Straßenbahnmotoren werden auch Einlagen aus Mika und Mikanit verwendet. Eine mechanisch feste und gut isolierende Oberfläche wird auf folgende Art erhalten. Die Spule wird in Japan-A-Lack getränkt, mit Isolierstoff umkleidet, wieder in A-Lack getränkt und schließlich mit Sterling Lack oder Excelsiorlack gestrichen.

33. Anordnung der Doppelschlußwicklung.

Einige gebräuchliche Anordnungen der Doppelschlußwicklung sind in Fig. 225 dargestellt. In den Fig. 225 Nr. 1 bis 3 liegt die Hauptschlußwicklung über der Nebenschlußwicklung; in Fig. 225 Nr. 1 besteht die erstere aus Draht oder Kabel, in Fig. 225 Nr. 2 aus Draht von rechteckigem Querschnitt, welcher weniger Wicklungsraum beansprucht, und in Fig. 225 Nr. 3 aus Lagen von Kupferband, die durch Papierzwischenlagen isoliert sind. Da die zwischen der Haupt- und Nebenschlußwicklung vorhandene maximale Spannungsdifferenz gleich der Klemmenspannung ist, ist eine entsprechende Isolation vorzusehen.

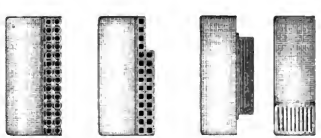


Fig. 225. Anordnung der Doppelschlußwicklung.

In den Fig. 225 Nr. 4 und 226 sind Haupt- und Nebenschlußwicklung getrennt gewickelt. Die Hauptschlußwicklung besteht aus Kupferband, das flach oder hochkant gebogen wird. Die getrennte Herstellung erleichtert das Aufbringen und Abnehmen der Spulen, und auch in bezug auf die Abkühlung ist diese Anordnung günstiger als die erstbeschriebene. Fig. 226 entspricht einer Ausführung der Westinghouse Electric and Mfg. Co.; im Vordergrund ist noch eine Windung des Stabankers sichtbar.

Digitized by Google

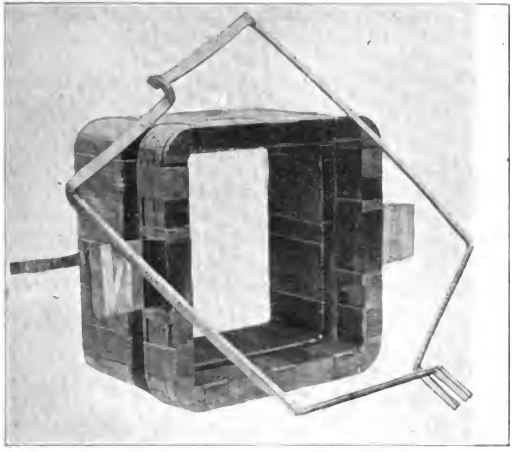


Fig. 226. Westinghouse Electric and Mfg. Co.

Wegen der großen Stromstärken werden die Hauptschlußspulen häufig gruppenweise parallel geschaltet. Fig. 227 zeigt eine Anordnung, bei welcher alle Spulen parallel geschaltet sind. S_1, S_2 sind zwei Sammelschienen, welche die Klemmen der einzelnen Spulen untereinander verbinden. Der Shuntwiderstand zur Regulierung der Kompoundierung wird ebenfalls an diese Schienen angeschlossen.

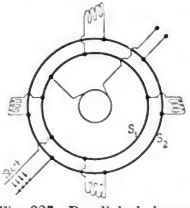


Fig. 227. Parallelschaltung von Hauptschlußspulen.

Digitized by Google

Achtes Kapitel.

Prüfung der Isolation und Ausbalancierung.

34. Prüfung der Isolation. — 35. Ausbalancierung der rotierenden Teile.

34. Prüfung der Isolation.

Da die meisten Defekte an elektrischen Maschinen durch Durchschlagen der Isolation entstehen, so ist es wichtig, die Isolation genau zu prüfen. Die Prüfung soll in verschiedenen Stadien der Fabrikation vorgenommen werden, damit man einen Anhalt bekommt, wie die Isolierstoffe sich bei der Bearbeitung verhalten.

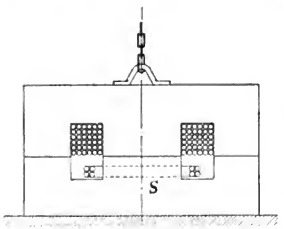


Fig. 228. Prüftransformator für einzelne Ankerspulen.

Besteht die Ankerspule aus mehreren Windungen oder werden mehrere Spulen vor dem Einlegen in die Ankernuten gemeinsam isoliert, so soll zunächst und zwar vor dem Einlegen der Spulen geprüft werden, ob innerer Kurzschluß zwischen zwei Windungen besteht. Zur Prüfung wird ein Transformator, Fig. 228, benutzt, und jede Spule *S* (oder mehrere gleichzeitig) zur sekundären Wicklung dieses Transformators gemacht. Die obere Hälfte des Transformators ist an einem Wagebalken befestigt, so daß man sie leicht abheben und neue Spulen einlegen kann.

Zu beobachten ist die primäre Stromstärke; sobald ein Kurzschluß sich einstellt, steigt sie plötzlich an. Die primäre Spannung des Transformators wird so bemessen, daß die Prüfspannung mindestens gleich der dreifachen normalen Spannung einer Spule wird.

Digitized by Google

Die gleiche Prüfung kann nötigenfalls wiederholt werden, nachdem die Spulen eingelegt sind. Hierzu dient die in Fig. 229 dargestellte Einrichtung. Der auf den Anker aufgesetzte Bügel trägt die primäre Spule des Transformators.

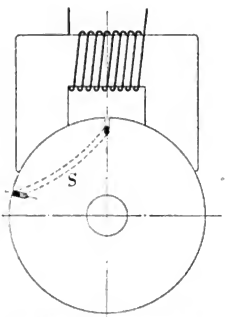


Fig. 229. Prüftransformator für fertige Anker.

Nachdem alle Spulen auf den Anker gebracht und bevor sie mit dem Kommutator verbunden sind, erfolgt die erste Prüfung auf Körperschluß (Schluß gegen den Ankerkörper); die zweite Prüfung wird vorgenommen, nachdem der Anker vollkommen fertiggestellt ist. Außerdem kann während der Herstellung der Wicklung mit einem direkt zeigenden Galvanometer wiederholt eine Isolationsmessung vorgenommen werden, wodurch direkte Kurzschlüsse sofort ermittelt werden.

Bei der Wahl der Spannung des Wechselstromes zur Prüfung auf Körperschluß ist zu beachten, daß der Anker in warmem Zustande einen kleineren Isolationswiderstand besitzt als im kalten.

Die Magnetspulen können auf ihre Isolierfestigkeit ebenfalls mit dem Apparat Fig. 228 geprüft werden. Bei der St. Louis Transit Company[1]) ist speziell für die Prüfung der Magnetspulen von Bahnmotoren ein Apparat nach Fig. 230 in Anwendung. Dieser beruht auf demselben Prinzip wie die Anordnung Fig. 228, ist jedoch in der Handhabung bequemer, weil der obere Teil des Transformators drehbar gelagert und durch ein Gewicht ausbalanciert ist.

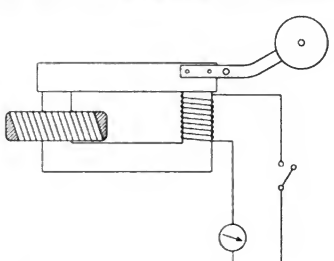


Fig. 230. Apparat zur Prüfung der Magnetspulen von Bahnmotoren.

Ein gut isolierter Anker soll bei einer Prüfdauer von einer Minute folgende Spannungen aushalten:

[1]) ETZ 1904, S. 342.

Digitized by Google

Klemmenspannung des Ankers bis	Wicklung gegen den Körper kalt	warm (60° C)
250 Volt	2000 Volt	1500 Volt
500 „	2600 „	2000 „
750 „	3200 „	2500 „
1000 „	4000 „	3000 „

Die Anker von Straßenbahnmotoren für 500 Volt Klemmenspannung werden vielfach mit 4000 bis 5000 Volt geprüft. Den angegebenen Spannungen liegt eine annähernd sinusförmige Spannungskurve zugrunde, so daß die maximale Spannung $\sqrt{2}$ mal so groß wird.

Bevor der Kommutator mit der Wicklung verbunden wird, wird die Isolation der Lamellen gegen das Gehäuse und unter sich geprüft. Die Prüfspannung darf um 500 bis 1000 Volt größer sein als die oben für die Wicklung angegebene. Die Prüfung auf Körperschluß erfolgt in der Art, daß die Lamellen mittelst eines Drahtes kurzgeschlossen werden, so daß alle Lamellen gleichzeitig die Spannungsdifferenz gegen das Gehäuse auszuhalten haben.

Für die Prüfung der Isolation zwischen den Lamellen genügt in allen Fällen eine Spannung von 250 Volt.

Die Verbandsnormalien schreiben eine Prüfung auf Isolierfestigkeit (Durchschlagsprobe) bei warmem Zustande der Maschine vor, und zwar müssen Maschinen bis 5000 Volt mit der doppelten Betriebsspannung, jedoch nicht mit weniger als 100 Volt geprüft werden und müssen diese Spannung $^1/_2$ Stunde lang aushalten.

Diese Bedingungen gelten auch für die Magnetspulen der Nebenschlußmaschinen.

Für Magnetspulen mit Fremderregung ist die Prüfspannung das Dreifache der Erregerspannung, jedoch mindestens 100 Volt. Es ist für diese Spulen eine höhere Prüfspannung gewählt, weil beim Abschalten in der Magnetwicklung hohe Spannungen auftreten können.

Die Angaben über die Prüfspannungen gelten unter der Annahme, daß die Prüfung mit der gleichen Stromart vorgenommen wird, mit welcher die Wicklungen im Betriebe benutzt werden. Wird jedoch die Magnetwicklung mit Wechselstrom geprüft, so braucht nur der 0,7fache Wert der vorgenannten Prüfspannungen angewendet zu werden.

Digitized by Google

35. Ausbalancierung der rotierenden Teile.

Um Erschütterungen der Maschine zu verhindern und einen möglichst ruhigen Gang der rotierenden Teile zu erhalten, was mit Rücksicht auf die Kommutation und die Beanspruchung der Lager und der Isolierstoffe der Maschine durchaus erforderlich ist, müssen Anker und Kommutator ausbalanciert werden. Bei Maschinen mit mäßiger Umfangssgeschwindigkeit (bei Ankern bis etwa 30 m/sec, bei Kommutatoren bis 20 m/sec) reicht eine statische Ausbalancierung aus. Zunächst wird der Ankerkörper ohne Bewicklung ausbalanciert und nach Fertigstellung der Wicklung nochmals geprüft. Die statische Ausbalancierung geschieht, indem der Anker mit einer Welle auf zwei horizontale Schneiden gelagert und untersucht wird, ob in irgend einer Lage ein Übergewicht nach einer Seite vorhanden ist. Dieses Übergewicht wird dann ausgeglichen, indem man durch Ausbohrungen Material fortnimmt, oder indem man Stücke einschraubt oder in besonders hierzu angeordnete Taschen Blei eingießt.

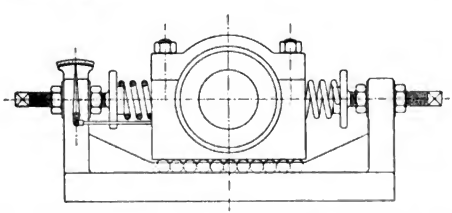


Fig. 231a. Bei der Ausbalancierung verwendetes Lager der A. E.-G., Berlin.

Bei Maschinen mit höherer Umfangsgeschwindigkeit reicht die statische Ausbalancierung in der Regel nur dann aus, wenn die einzelnen Teile des Ankers, wie der Ankerstern und die Preßplatten der Ankerbleche für sich ausbalanciert werden. Die Ankerbleche sind in diesem Falle paketweise mit dem Anker auszubalancieren und die Wicklung ist aus ganz gleichartigen Teilen zusammenzusetzen. — Meist ist es jedoch für Anker mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten notwendig eine dynamische Ausbalancierung vorzunehmen, denn auch dann, wenn der Ankerkörper statisch vollkommen ausbalanciert ist, können Erschütterungen dadurch auftreten, daß nicht alle Ebenen senkrecht zur Welle ihren Schwerpunkt in der Achsenmitte haben. Ist dies der

Digitized by Google

Fall, so treten Kräftepaare auf, welche die Welle auf Biegung beanspruchen.

Die dynamische Ausbalancierung geschieht, indem man den Ankerkörper mit Welle versehen in Rotation versetzt und die Welle auf beiden Seiten so lagert, daß sie frei ausschwingen kann. Dies kann z. B. geschehen, indem man die Lager der Welle an Drahtseilen aufhängt. Man erhält jetzt mittelst festgehaltener Kreide auf dem schwingenden Ankerkörper Zeichen an den Stellen, welche den größten Ausschlag haben.

Die A. E.-G. stützt, wie Fig. 231a zeigt, die Lager auf Kugeln und beschränkt ihren seitlichen Ausschlag durch Federn. Die Schwingungen der Lager werden durch einen Zeiger in vergrößertem Maßstab angezeigt.

Anstatt dem Lager durch Rollen und Federn Beweglichkeit zu verschaffen, kann es auch auf Gummikissen gestellt werden, ein Verfahren, das mit gutem Erfolg in Gebrauch ist.

Der Antrieb des Ankers erfolgt in allen Fällen durch einen möglichst leichten Riemen, der auf dem Ankerkörper aufliegt und durch einen Motor angetrieben wird.

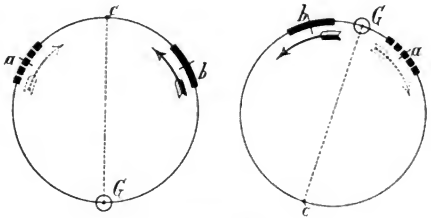


Fig. 231b.

Damit der vom Riemen auf den Anker ausgeübte Zug möglichst klein gemacht werden kann, muß der Motor mit einer Riemenspannvorrichtung versehen sein, damit beim ersten Antrieb der Riemen etwas fester angespannt und nachher gelockert werden kann.

Um die Stelle zu bestimmen, an der das Gegengewicht anzubringen ist, wird der Anker einmal nach links und das andere Mal nach rechts angetrieben, und zwar mit einer Umdrehungszahl, die der kleinsten Eigenschwingungszahl des Ankers entspricht. Sie wird durch langsames Steigern der Umdrehungszahl ermittelt.

Digitized by Google

Für beide Drehrichtungen werden dann mittelst Kreide (für jede Drehrichtung eine besondere Farbe) die Stellen des größten Ausschlages markiert. Von den Mitten der erhaltenen Marken *a* und *b* (Fig. 231 b) ausgehend und der ihnen zugehörigen Pfeilrichtung folgend, erhält man den Halbierungspunkt *c*. Diesem diametral gegenüber ist das Schwergewicht *G* anzubringen.

Es ist zu empfehlen, den Anker vor der Ausbalancierung mehrere Stunden bei voller Tourenzahl laufen zu lassen, damit die Wicklung sich setzt und eine unveränderliche Lage annimmt, die sich später im Betriebe nicht mehr ändert. Ein festes und sicheres Zusammenbauen der Wicklung ist dabei von größter Wichtigkeit.

Um das Anbringen von Zusatzgewichten zu erleichtern, werden besondere Vorrichtungen vorgesehen. In Tafel VII (Turbogenerator der A.-G. Brown, Boveri & Co.) sind z. B. Aussparungen in den Schrumpfringen des Kommutators angebracht, während in Tafel IV (Turbogenerator der Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B.) im Ankerkörper eine Reihe mit Gewinde versehener Löcher gebohrt sind, in welche Bolzen geschraubt werden können.

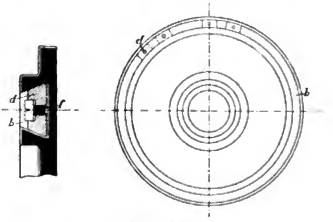


Fig. 232.

Eine bequeme Methode zum raschen Ausbalancieren hat Ferranti im E. P. 4556B vom Jahre 1904 angegeben (Fig. 232). Am Rande des Ankerkörpers ist eine schwalbenschwanzförmige Rinne *b* eingedreht, in die man eine Reihe Zusatzgewichte *d* einschiebt. Diese Gewichte werden so lange am Umfang verschoben und durch Schrauben *f* angepreßt, bis dynamisches Gleichgewicht vorhanden ist.[1])

[1]) Niethammer, Z. f. E. 1905, S. 560.

Digitized by Google

Neuntes Kapitel.

Lagerkonstruktionen.

36. Einteilung der Lager. — 37. Gleitlager. — 38. Kugellager.

36. Einteilung der Lager.

Die Berechnung der Lagerreibung und der Lagererwärmung wurde eingehend im Band I (S. 671 u. 747) erörtert. Wir wollen uns hier auf die Konstruktion der Lager beschränken.

Die Lager für Maschinen mit horizontaler Welle sind entweder Gleitlager oder Kugellager.

Auch kommen Maschinen mit vertikaler Welle häufig vor, z. B. für direkte Kupplung mit Zentrifugen oder Wasserturbinen, für Umformeraggregate (um Platz zu sparen) und für Zentrifugalpumpen. Auch bauen einige Firmen ihre Turbogeneratoren mit vertikaler Welle (z. B. General Electric Co.). Für kleinere Maschinen (z. B. für Kupplung mit Zentrifugen) verwendet man mit Vorteil Kugellager. Für größere Maschinen kommen nur Spurlager, welche, wenn erforderlich, mittelst Öldruckes entlastet werden, in Betracht. Im allgemeinen ist gerade das Spurlager der schwache Punkt bei Maschinen mit vertikaler Welle; so kann z. B. ein Versagen der Preßölpumpe ernstliche Beschädigungen mit sich bringen. Aus diesem Grunde haben die Maschinen mit vertikaler Welle sich verhältnismäßig wenig eingebürgert.

Ein Beispiel eines Umformeraggregates mit vertikaler Welle zeigt Tafel I.

Wir wollen im Nachfolgenden die Gleitlager und die Kugellager gesondert betrachten.

Digitized by Google

37. Gleitlager.

Die Gleitlager werden im Dynamobau mit Ausnahme der Lager von Bahnmotoren fast immer mit Ringschmierung versehen.

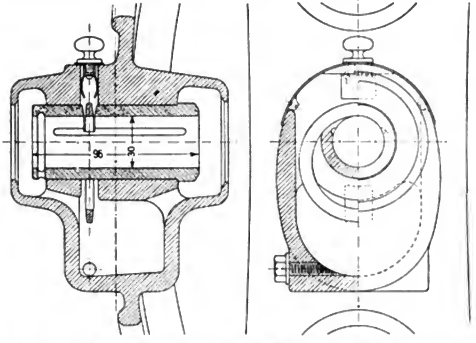


Fig. 233. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

In Fig. 233 ist ein kleines Lager mit einteiliger Lagerschale oder Lagerbüchse aus Bronze, wie es in ähnlicher Art vielfach ausgeführt wird, abgebildet. Ein Lager von größeren Abmessungen

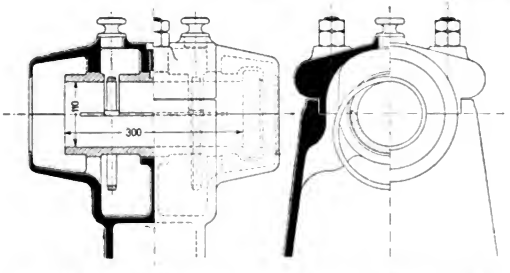


Fig. 234. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B.

mit einteiliger Schale und zwei Schmierringen zeigt Fig. 234. Obwohl Lager von 300 bis 400 mm Länge bei rasch laufenden Wellen

Digitized by Google

von einem Schmierring noch genügende Schmierung erhalten, ist es der Sicherheit wegen doch ratsam, bei Längen über etwa 150 bis 200 mm zwei Schmierringe anzuwenden. Auf der einen Seite ist die Lagerschale erweitert, damit das von der Welle abgeschleuderte Öl aufgefangen wird. Der Lagerkörper ist zweiteilig, so daß bei abgehobenem Deckel der Anker aus dem Gestell gehoben werden kann.

Gebräuchliche Arten von größeren Lagerkonstruktionen stellen Fig. 235 und 236 dar. Die Lagerschale ist zweiteilig; sie besteht aus zähem Gußeisen und einer Fütterung aus einer weichen Legierung von Weißmetall.[1])

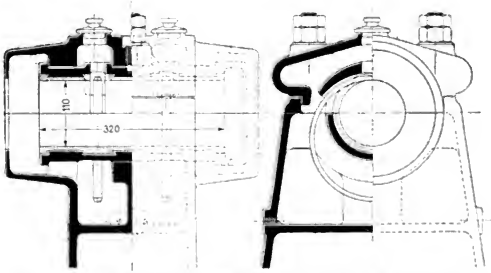


Fig. 235. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B.

Das weiche Lagermetall ermöglicht ein gutes und rasches Einlaufen der Welle und ist daher sehr zu empfehlen. Die Legierung wird um ein Kaliber, das durch Führungen in der Mitte der Lagerschalen gehalten wird, in flüssigem Zustande eingegossen. Ein Ausbohren der Schalen ist nicht notwendig.

Eine eigenartige Konstruktion des Lagerkörpers zeigt das in Fig. 237 abgebildete Lager der A.-G. Volta, Reval. Die Lagerschale ist einteilig und die umschließende Gußhülse mit der Ölkammer wird mittelst zweier Schrauben auf dem Lagerbock befestigt. Diese Abtrennung des Lagers hat für die Fabrikation und die Verwendung gewisse Vorteile.

Die Dicke der Weißmetallschicht ist im allgemeinen

$$= \frac{d_z}{16}$$

[1]) Z. B. Magnoliametall, eine Legierung aus Blei, Zinn und Antimon.

Digitized by Google

Fig. 236. Vereinigte Elektricitäts-Actien-Gesellschaft, Wien.

Digitized by Google

und die Dicke der Gußschale

$$= \frac{d_z}{6},$$

wo d_z den Zapfendurchmesser bedeutet.

Bei den jetzt angeführten Gleitlagern sitzt die Lagerschale auf der ganzen Länge fest im Lagerkörper auf, ein Verbiegen der Schale, das eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Pressung zur Folge haben würde, wird daher nicht stattfinden, dagegen kann

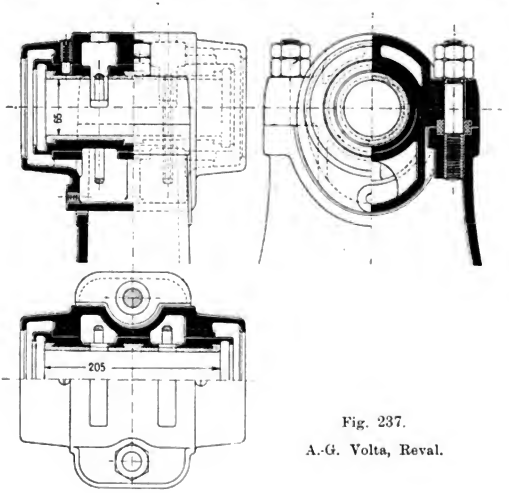


Fig. 237.

A.-G. Volta, Reval.

sich das Lager nicht selbsttätig in die Achsenrichtung einstellen, wodurch, bei ungenauer Arbeit oder Durchbiegung der Welle, ebenfalls hohe Lagerpressungen entstehen können. Einige Konstrukteure wenden daher Gleitlager mit Kugelschalen an, besonders wenn eine Welle mehr als zwei Lager erhält. Da die Berührungsfläche mit dem Lagergehäuse wesentlich verkleinert wird, ist die Abkühlung der Lager verschlechtert.

Ein solches Lager der Bergmann Elektromotoren- und Dynamowerke veranschaulicht Fig. 238 und ein ebensolches Fig. 239, das einer von den Ateliers de Constructions Electriques de

Digitized by Google

Charleroi ausgeführten Dynamo entnommen ist. Die äußere Lagerschale ist aus Stahlguß und sehr kräftig gehalten, so daß eine Verbiegung nicht eintritt; in der Mitte ist sie kugelförmig abgedreht und in dem kugelförmig ausgedrehten Lagerkörper beweglich.

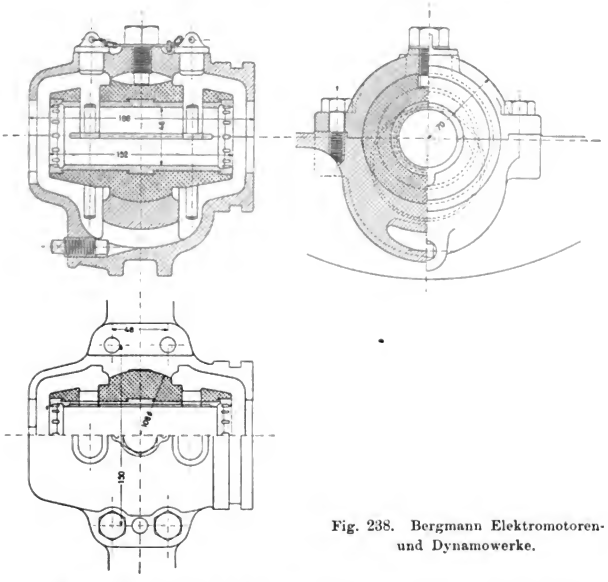


Fig. 238. Bergmann Elektromotoren- und Dynamowerke.

Wird das Produkt aus spezifischem Flächendruck und Umfangsgeschwindigkeit $p v_s$ größer als 15 bis 20, was meist bei großen Turbogeneratorlagern der Fall ist, so reichen die Ringe zur Herbeiführung des nötigen Öles nicht mehr aus. Man muß dann das Öl unter Druck zuführen und das Lager künstlich kühlen.

Ein Turbogeneratorlager mit Preßöl und künstlicher Kühlung zeigt Fig. 240. Die Konstruktion stammt von der Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth.[1]) Das Lager setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Die Lagerung der beiden Lagerschalen findet in einer in der Mitte des

[1]) Niethammer, Elektrotechnik und Maschinenbau 1906, S. 739.

Digitized by Google

Lagerbockes abgestützten Hülse statt, die infolge ihrer kurzen Abstützung sich einstellen kann. Das System schmiegt sich daher jeder Deformation des Lagerzapfens leicht an. Die Lagerschalen sind mit Weißmetall ausgegossen. Bei der Konstruktion ist Sorge getragen, daß die warme Luft oben aus dem Lager treten kann.

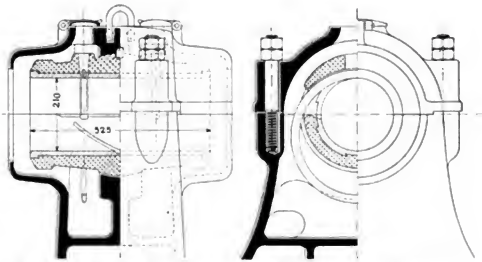


Fig. 239. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

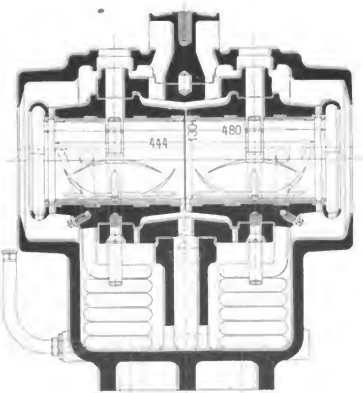


Fig. 240. E.-G. Alioth.

Das Preßöl tritt von unten in die Lagerschalen ein. Außerdem sind noch Schmierringe vorgesehen. Im Ölbehälter sind Kühlschlangen eingebaut. Es hat sich bei diesem Lager gezeigt, daß

Digitized by Google

bei einer Zapfengeschwindigkeit von 10,5 m/sec die Ringschmierung noch allein ausreicht und daß bei einer Zapfengeschwindigkeit unter 14 m/sec eine besondere Kühlung des Öles noch nicht nötig ist. Der Ölverbrauch betrug bei 13 m/sec Zapfengeschwindigkeit 0,8 *l* pro Minute bei 1,5 Atmosphären Druck.

Die künstliche Kühlung kann durch Wasser auch so erfolgen, daß in die Lagerschalen Röhren eingegossen werden oder indem die Lagerschalen doppelwandig ausgeführt werden.

Ein Turbinenlager mit doppelwandigen Lagerschalen und Preßölschmierung zeigt Fig. 241 nach einer Ausführung der Maschinenfabrik Oerlikon.[1])

Die Gleitlager haben zwei grundsätzliche Mängel, welche in der Notwendigkeit des Einlaufens und in der Abhängigkeit von der Schmierung bestehen. Das Einlaufen hängt von der Art des Lagermetalls ab. Nach dem Einlaufen ist das Schmiermittel von größerem Einfluß als das Lagermetall, nur wenn Fremdkörper ins Lager gelangen, kommt die gute oder schlechte Eigenschaft der Lagermetalle zur Geltung. Die Zapfenpressung kann um so größer gewählt werden, je vollkommener das Einlaufen und die Schmierung erfolgt. Die Schmierung erfolgt um so besser, je rascher die Welle umläuft, in allen Fällen ist jedoch auf eine gute und zweckmäßige Zu- und Abfuhr des Öles größtes Gewicht zu legen.

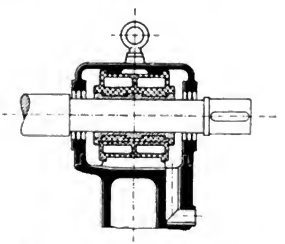


Fig. 241. Maschinenfabrik Oerlikon.

Die Ölzufuhr zu den Gleitflächen wird durch sog. Schmiernuten (s. Fig. 238 und 239), welche an den inneren Flächen der Lagerschalen hergestellt werden, wesentlich verbessert. Eine gute Schmierung erhält man nach J. Riemer,[2]) wenn man den Zapfen mit wenigen flachen Schmiernuten in Richtung der Achse versieht. Die Ränder der Nuten müssen natürlich mit einer Schlichtfeile sorgfältig abgerundet werden. Bei großen Dynamos haben sich diese Nuten vorzüglich bewährt und wesentlich geringere Lagerlängen ermöglicht.

Die Schmierringe werden aus Bronze ein- oder zweiteilig hergestellt. Sie dürfen nicht zu tief in das Öl eintauchen, weil

[1]) Electrician 1906, S. 455.

[2]) Zeitschrift des Vereins deutscher Ing. 1895, S. 654 u. f.

Digitized by Google

sonst ihre Geschwindigkeit infolge der vermehrten Reibung verringert wird. — Der Ölbehälter soll tief sein, damit sich die Verunreinigungen des Öles zu Boden setzen können.

Bei der Ölabfuhr ist hauptsächlich zu beachten, daß das Öl nicht außerhalb des Lagers gelangt und die Maschine verunreinigt. Das Öl quillt sowohl an den beiden Enden als durch die Fugen

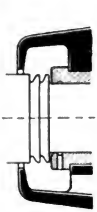


Fig. 242.

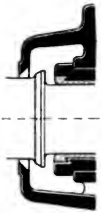


Fig. 243.

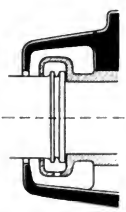


Fig. 244.

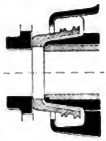


Fig. 245.

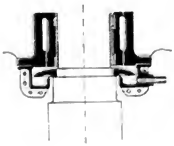


Fig. 246.

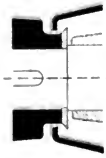


Fig. 247.

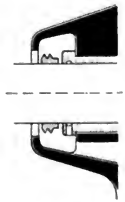


Fig. 248.

von geteilten Lagerschalen heraus. In den Fig. 242 bis 248 sind verschiedene Anordnungen gezeichnet, welche den Zweck verfolgen, das an den Enden der Lagerschalen austretende Öl von der Welle abzuschleudern. Vorzüglich bewährt sich die in Fig. 233 und auch in den Lagerkonstruktionen Fig. 237 und 238 dargestellte Form der Lagerschale. Bevor das Öl austritt, gelangt es zu einer Rille der Schale und fließt von da durch kleine Öffnungen ab.

Damit das Öl nicht seitlich durch den Schnitt des Lagerdeckels austreten kann, ist dieser Schnitt in den Lagern Fig. 234, 235, 236, 238 höher gelegt, als der Schnitt der Lagerschalen.

Digitized by Google

38. Kugellager.

Die Kugellager werden heutzutage viel gebraucht, und zwar hauptsächlich für Maschinen bis etwa 30 KW. Sie haben sich da als vollkommen betriebssicher und gerade für die Zapfengeschwindigkeiten normaler Dynamomaschinen als ganz besonders geeignet erwiesen. Diese Betriebssicherheit verdanken sie zum großen Teil den Vervollkommnungen der Stahlkugeln und Spurringe durch die Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken. Durch Untersuchungen von Prof. Stribeck[1]) wurde der Beweis erbracht, daß richtig bemessene und sorgfältig durchgebildete und ausgeführte Kugellager gerade hinsichtlich der Betriebssicherheit weitgehenden Anforderungen entsprechen und ihre Anwendung auch dort angezeigt ist, wo Gleitlager rasch abgenützt werden. Die Kugellager haben gegenüber den Gleitlagern u. a. folgende Vorteile:

1. Geringere Abnützung, und infolgedessen eine dauernd zentrische Lage des Ankers, wodurch kleinere Lufträume zulässig werden.

2. Geringere Verluste.

3. Geringere Raumbeanspruchung, besonders in axialer Richtung, dadurch gedrängtere Bauart der Maschine und kürzere Wellen.

4. Geringerer Verbrauch an Schmiermaterial, dadurch geringere Überwachung (Schmieren nur einmal pro Monat) und keine Verunreinigung durch Austropfen von Öl.

5. Einlaufen des Lagers ist nicht erforderlich.

6. Leichtere Auswechselbarkeit.

Fig. 249 zeigt eine ältere Ausführung der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken.

Sie besteht aus einem inneren Laufring *a*, einem äußeren Laufring *b*, den Kugeln *c* und dem Schlosse *A* mit Schraube *e*; letzteres verschließt die zum Einfüllen der Kugeln angebrachte Öffnung. Die Laufringe sind gehärtet, ihre Auflageflächen geschliffen, die Laufbahnen poliert, und ebenso sind die Kugeln gehärtet, geschliffen und poliert.

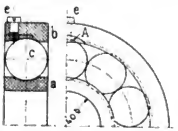


Fig. 249. Laufringsystem der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken.

Diese Anordnung hat den Nachteil, daß, sobald sich die Welle durchbiegt, der Ring *a* nicht mehr in der Ebene des Ringes *b* steht und daher die Kugeln an verschiedenen Stellen des Ringes mit

[1]) Z. d. V. D. I. 1901, S. 73.

Digitized by Google

verschiedener Geschwindigkeit laufen müssen. Hierdurch stoßen die Kugeln aufeinander, werden unrund und erzeugen ein singendes oder pfeifendes Geräusch.

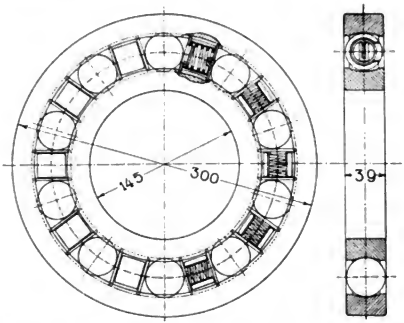


Fig. 250. Laufringsystem neuerer Konstruktion der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken.

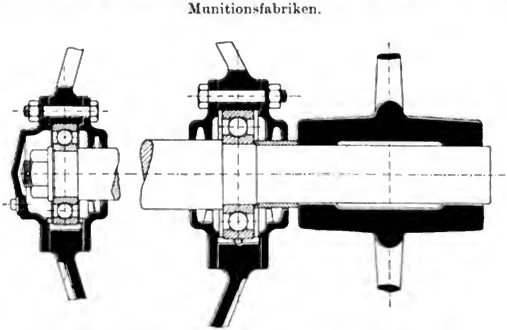


Fig. 251 und 252. Einbau der Kugellager nach Fig. 250.

Bei der neueren Konstruktion ist dies beseitigt. Es ist hier nur etwa die Hälfte des Raumes mit Kugeln ausgefüllt, und zwischen die Kugeln sind Spiralfedern eingelegt. Die Federn sind innen mit Filz ausgefüllt und wirken als ein mitrotierendes Schmierkissen.

Eine derartige Konstruktion der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken zeigt Fig. 250. Bei dieser Ausführung sind

Digitized by Google

die Federn an ihren Enden noch in Platten befestigt und um jede Feder ist eine Schelle gelegt.

Fig. 251 und 252 [1]) zeigen den Einbau der Kugellager auf der Kommutatorseite und auf der Riemscheibenseite bei einer Maschine mit Lagerschildern. Die inneren Laufringe sind gegen Ansätze der Welle gespannt, und zwar in Fig. 251 durch eine festgezogene, gesicherte Mutter und in Fig. 252 durch ein Rohrstück, gegen welches sich die festgekeilte Nabe der Riemscheibe legt. Der Spielraum zu beiden Seiten der äußeren Ringe ist so bemessen, daß nur das Laufringsystem auf der Kommutatorseite die axiale Fixierung der Welle übernimmt, während der äußere Laufring des Systems auf der Riemscheibenseite so viel Luft hat, daß selbst bei groben Ungenauigkeiten ein seitliches Verspannen der Laufringsysteme nicht vorkommen kann.

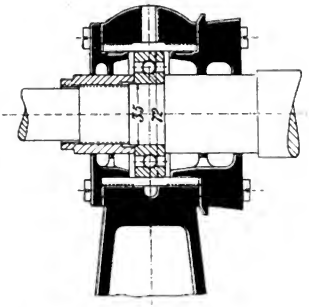


Fig. 253. Kugellager in Lagerbock angeordnet.

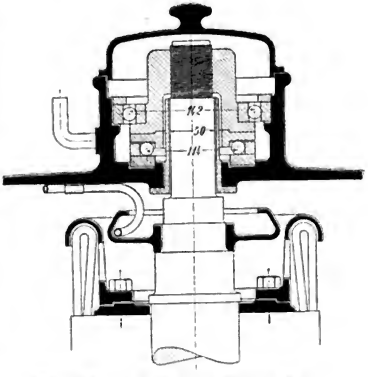


Fig. 254. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.

Fig. 253 zeigt ein in einem Lagerbock angeordnetes Kugellager. Hier wird der innere Ring durch eine Mutter auf die Welle gegen den Ansatz der Welle gepreßt.

Fig. 254 zeigt nach einer Ausführung der E.-A.-G. vorm.

[1]) Broschüre der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken.

Digitized by Google

Kolben & Co. die Anwendung von Kugellagern bei einem kleineren Motor mit vertikaler Welle. Es sind hier zwei Systeme angeordnet. Das eine dient zur Aufnahme des axialen Druckes, das andere als Führungslager.

Nach den Untersuchungen von Prof. Stribeck ist die zulässige Belastung P_1 einer Kugel dem Quadrate ihres Durchmessers d_k proportional, also

$$P_1 = k\, d_k^2.$$

Für die Laufringsysteme der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken, mit Kugeln in hohler Rinne, deren Krümmungsradius $= \frac{3}{5}\, d_k$ ist, wird

$$k = 150$$

gesetzt; die Versuche ließen sich jedoch bis $k = 450$ noch ausführen.

Nimmt man an, daß nur der fünfte Teil der Kugeln volltragend ist, so wird die zulässige Belastung P des Lagers

$$P = \frac{Z}{5}\, k\, d_k^2 = 30 \cdot Z\, d_k^2, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

wo Z die Anzahl der Kugeln bedeutet und d_k in cm einzusetzen ist.

Digitized by Google

Zehntes Kapitel.

39. Beispiele ausgeführter Maschinen.

1. **Vereinigte Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Wien. Motor. 2,6 PS, 2550 Umdr. pro Min.** 160 Volt, 15,5 Amp. (Fig. 255 und 256.)

Dieser raschlaufende vertikale Kapselmotor dient zum direkten Antrieb einer Zentrifugalpumpe und ist vollständig geschlossen. Das obere Lager ist als Kugellager ausgebildet und trägt den rotierenden Teil des ganzen Aggregates. Es ist durch eine abschraubbare Deckelklappe zugänglich. Das untere Lager ist ein Führungslager. Die Schmierung erfolgt in beiden selbsttätig, indem das Öl infolge Rotation durch ein Rohr gedrückt wird. Der Kommutator und die Bürsten sind durch vier Öffnungen im Gußgehäuse, welche durch einen Blechmantel dicht abgeschlossen werden können, zugänglich gemacht.

Die Ankerbleche sind mit axialen Luftschlitzen versehen. Je vier flügelartige Rippen an den beiden Bronze-Preßplatten erzeugen eine kräftige Luftzirkulation. Die Magnetpole sind lamelliert.

Eine fünfstündige Dauerprobe ergab folgende Erwärmungen:

Temperatur des Ankerkupfers	aus Widerstandszunahme		50° C.
„ des Feldkupfers	„	„	55° C.
„ des oberen Lagers	gemessen		35° C.

Der Wirkungsgrad aus den Einzelverlusten berechnet beträgt 78,2 %.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 1.)

Anker:			Wicklung:	
Durchmesser	$D = 18{,}9$ cm		Reihenwicklung	$a = 1$
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 6{,}3$ „		Leiterzahl	$N = 744$
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 6{,}3$ „		Leiterdurchmesser	$\phi = 1{,}8/2{,}3$ mm
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 2{,}4$ „		Nutenzahl	$Z = 31$
			Nutenabmessungen	$8{,}5 \times 23$ mm

Digitized by Google

Fig. 255.

Fig. 256.

Fig. 255 und 256. Vereinigte Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Wien. Motor mit vertikaler Welle, 2,6 PS, 2550 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 12{,}4$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 3{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 93$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	4
Bürsten pro Stift	1
Bürstenabmessungen	1,2×2,5 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_i = 10{,}5$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 6{,}3$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 27{,}6$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 32$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 3000
Drahtdurchmesser
$\phi = 0{,}6/0{,}85$ mm.

2. **Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 8 PS, 750 Umdr. pro Min.** 240 Volt, 30,5 Amp. (Fig. 257 u. 258.)

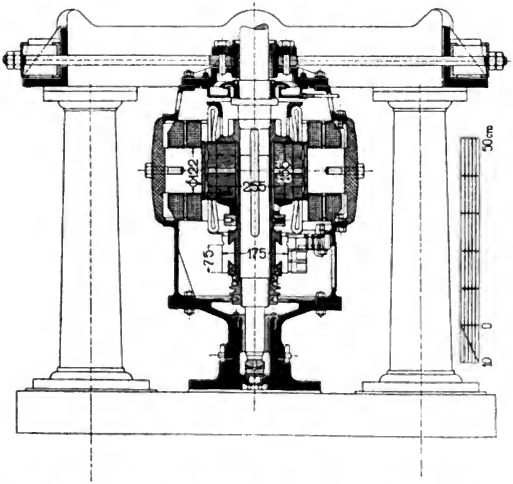


Fig. 257. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 8 PS, 750 Umdr. pro Min.

Der Motor ist mit vertikaler Welle, zum direkten Antrieb einer freischwingenden Zentrifuge, ausgeführt. Um die freie Ausschwingung beim An- und Auslaufen der Zentrifuge zu ermöglichen, ist die Nabe, welche das untere Führungslager und den Spurzapfen um-

Digitized by Google

Fig. 258. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 8 PS, 750 Umdr. pro Min.

schließt, in einer kugelförmigen Mulde gestützt. Das obere Führungslager wird seitlich durch sechs Stangen gehalten. Diese sind in einem feststehenden Gerüst geführt und tragen an ihren Enden Teller, welche sich gegen Federn legen, die gegen das Gerüst abgestützt sind. Der Ankerstern und die Kommutatorbüchse sind aus Stahlguß. Letztere ist auf die Nabe des Ankersternes aufgesetzt. Es sind nur zwei Bürstenstifte vorhanden, welche nach Entfernung eines Blechdeckels zugänglich sind.

Das Joch und die Pole sind aus Stahlguß. Die Feldspulen sind unterteilt.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 3.)

Anker:

Durchmesser	$D = 25{,}5$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 15{,}5$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 14{,}3$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 5$ „

Wicklung:

Reihenwicklung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 702$
Leiterdurchmesser	$\phi = 2{,}6/3{,}1$ mm
Nutenzahl	$Z = 39$
Nutenabmessungen	$= 11{,}5 \times 27$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 17{,}5$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 7{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 117$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	2
Bürsten pro Stift	2
Bürstenabmessungen	$0{,}9 \times 2{,}5$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_i = 16$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 15{,}5$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 117$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 80$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 2400$
Drahtdurchmesser	$\phi = 1{,}0/1{,}3$ mm.

Digitized by Google

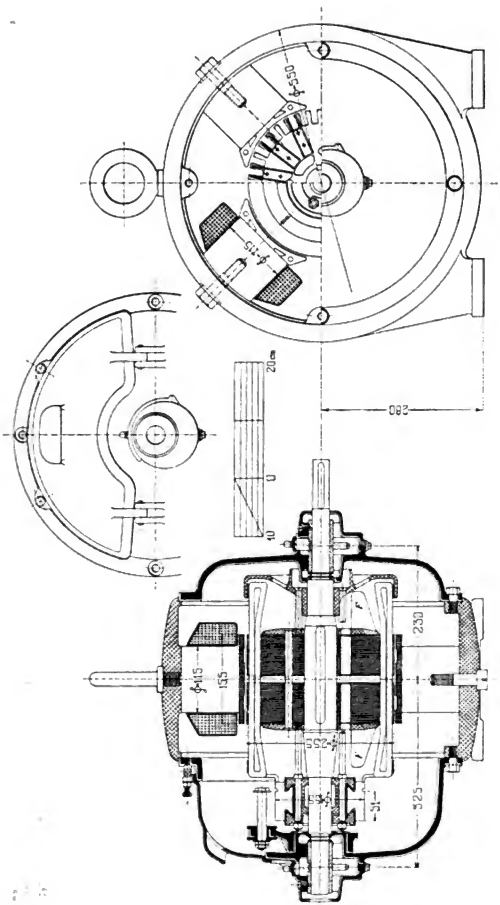


Fig. 259 und 260. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 12 PS, 2600 Umdr. pro Min.

Fig. 259.

Fig. 260.

Digitized by Google

3. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 12 PS, 2600 Umdr. pro Min. 450 Volt, 24,5 Amp. (Fig. 259 u. 260.)

Diese Maschine stellt eine geschlossene Type mit Lagerschildern dar. Der Kommutator und die zwei Bürstenstifte (zwei solche sind weggelassen) sind zugänglich gemacht durch einen drehbaren Deckel. Entsprechend der geschlossenen Form ist durch je vier Ventilationsflügel F, die an die Ankerpreßplatten angegossen sind, für eine gute Luftzirkulation gesorgt. Das Ankereisen hat vier axiale und einen radialen Luftschlitz. Die Wicklung wird in den Nuten durch Hartholzkeile gehalten. Die Stirnverbindungen auf der Kommutatorseite werden gegen die Wirkung der Fliehkraft durch Drahtbandagen und diejenigen auf der hinteren Seite durch eine Bronzekappe geschützt. Letztere und der Kommutator sind mit dem Anker durch je zwei Bolzen verbunden. Die lamellierten Polschuhe haben schwalbenschwanzförmige Nuten, in welche die gegossenen Stahlpole eingreifen.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 2.)

Anker:

Durchmesser	$D = 25{,}5$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 15{,}5$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 14{,}3$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 5$ „

Wicklung:

Reihenwicklung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 702$
Leiterdurchmesser	$\phi = 2{,}7/3{,}05$ mm
Nutenzahl	$Z = 39$
Nutenabmessungen	$= 11{,}5 \times 24$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 15{,}5$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 5{,}1$ „
Lamellenzahl	$K = 117$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	2
Bürsten pro Stift	2
Bürstenabmessungen	0,6×2,2 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_i = 16$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 15{,}5$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 102$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 80$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= \begin{cases} 5000 \\ 6000 \end{cases}$
Drahtdurchmesser	$\phi \begin{cases} 0{,}4/0{,}6 \text{ mm} \\ 0{,}5/0{,}7 \text{ „} \end{cases}$

4. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 50 KW, 725 Umdr. pro Min. 220 Volt, 227 Amp. (Fig. 261 und 262.)

Fig. 261 u. 262 zeigt eine Lagerschildtype für größere Leistung. Die Lager werden von zwei horizontal angeordneten Armen getragen.

Digitized by Google

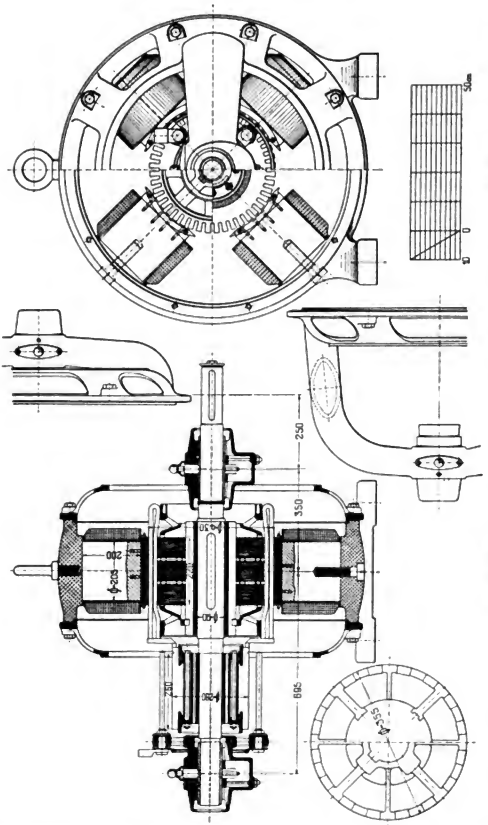


Fig. 262.

Fig. 261.

Fig. 261 und 262. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 50 KW, 725 Umdr. pro Min.

Bei der Bemessung ist für eine gute Ventilation Sorge getragen. Anker und Kommutator sind mit axialen Löchern versehen und die Pole sind hoch gehalten, um der Erregerwicklung große Abkühlungsflächen zu bieten. Die Bürstenbrille ist zweiteilig. Das

Digitized by Google

Joch ist aus Stahlguß, die Magnete aus Schmiedeeisen und die Polschuhe aus Blech.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 12.)

Anker:

Durchmesser	$D = 43$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 22$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 20$ „
Eisenhöhe	$h = 9{,}8$ „

Wicklung:

Reihenwicklung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 266$
Leiterquerschnitt	$= 2{,}5 \times 12$ mm²
Nutenzahl	$Z = 67$
Nutenabmessungen	$= 8{,}5 \times 32$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 26$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 18$ „
Lamellenzahl	$K = 133$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	4
Bürsten pro Stift	5
Bürstenabmessungen	$1{,}2 \times 2{,}2$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_i = 23$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 22$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 330$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 175$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 2200$
Drahtdurchmesser	$\varphi = 1{,}6$ mm.

5. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 125 PS, 430 Umdr. pro Min. 220 Volt, 460 Amp. (Fig. 263 u. 264.)

Fig. 263 u. 264 zeigen einen Motor mit Grundplatte und zwei Lagerböcken. Die Konstruktion dieser Maschine ist einfach gehalten. Die Preßplatten auf beiden Seiten des Ankers sind einzelne Gußstücke. Sie fassen den Blechkörper nicht längs dem ganzen Umfang, sondern die Bleche werden nur durch einzelne Zähne zusammengepreßt. Hierdurch wird eine gute Ventilation erzielt. Die Platten werden mittelst Schrauben zusammengepreßt, welche zur Hälfte in einem Arme des Ankersterns und zur Hälfte im Blechkörper liegen. Die Pole sind an das Stahlgußjoch angegossen. Die Polschuhe sind schwalbenschwanzförmig in die Pole eingelassen und außerdem mit diesen verschraubt.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 5.)

Anker:

Durchmesser	$D = 59{,}1$ cm	Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 31$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 32$ „	Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 9{,}9$ „

Digitized by Google

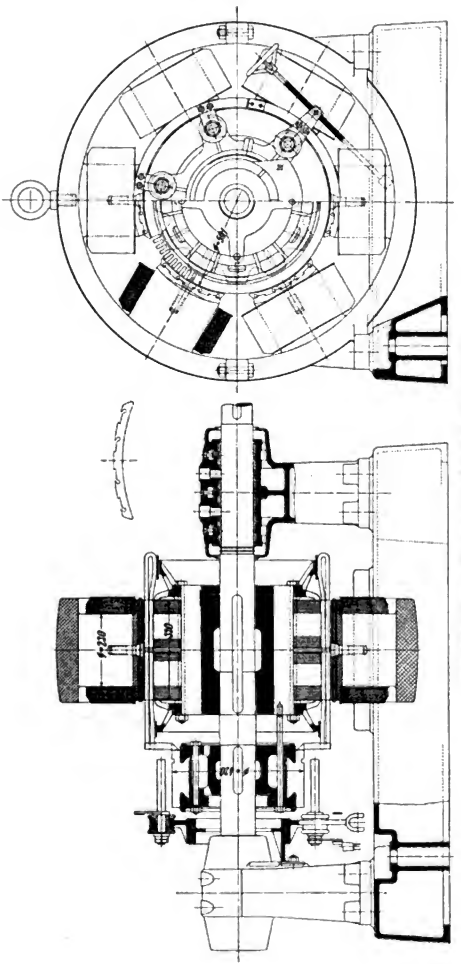


Fig. 263 und 264. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Motor, 125 PS, 430 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 3$
Leiterzahl	$N = 546$
Leiterabmessungen	1,8×12 mm
Nutenzahl	$Z = 91$
Nutenabmessungen	10×29 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 42$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 17{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 273$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	6
Bürsten pro Stift	5
Bürstenabmessungen	1,2×3,0 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$
Polbogen	$b_i = 24$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 32$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 415$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 230$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 1500
Drahtdurchmesser
$\phi = 1{,}8/2{,}2$ mm.

6. Siemens-Schuckertwerke. Generator, 150 KW, 500 Umdr. pro Min. 220 Volt, 680 Amp. (Fig. 265 und 266.)

Fig. 265 u. 266 zeigen die normale Konstruktion obiger Firma für Gleichstromgeneratoren mit Riemenantrieb.

Die Ankerkonstruktion ermöglicht eine gute Ventilation des Eisens und der Wicklung. Letztere ist eine Schleifenwicklung, die in den Nuten durch Keile befestigt ist. Der Kommutator sitzt auf der verlängerten Ankernabe, sein äußerer Preßring ist in einzelne Segmente geteilt, wodurch eine gleichmäßig gute Befestigung aller Lamellen, sowie deren Auswechselbarkeit erreicht wird. Der Bürstenstiftträger ist verschalungsartig ausgebildet und mittelst Spindel in einer Eindrehung am Joch verstellbar. Die Magnetpole sind lamelliert und an das gußeiserne Joch angeschraubt.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 14.)

Anker:

Durchmesser	$D = 66$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 31$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 25$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 10{,}25$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 3$
Leiterzahl	$N = 420$
Leiterquerschnitt	= 3,2×13 mm
Nutenzahl	$Z = 70$
Nutenabmessungen	= 12,6×35 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 56$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 31$ „
Lamellenzahl	$K = 210$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	6
Bürsten pro Stift	12
Bürstenabmessungen	= 1,5×1,8 cm

Digitized by Google

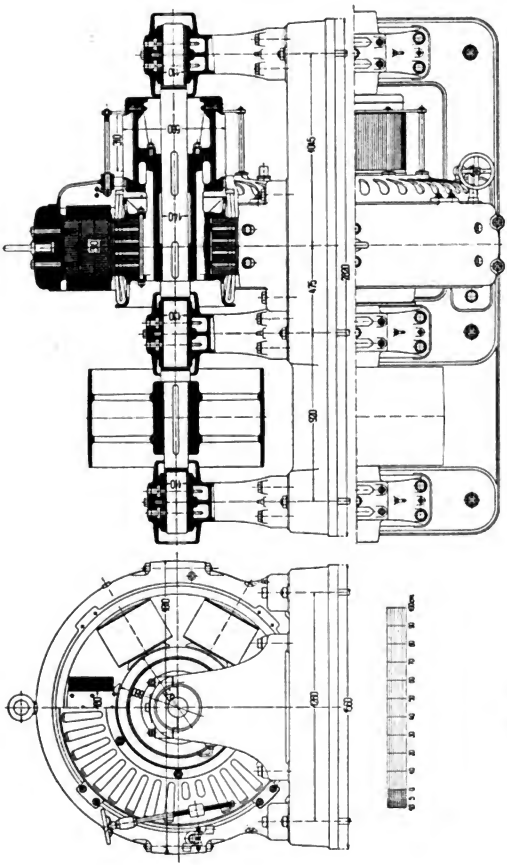


Fig. 265. Fig. 266.

Fig. 265 und 266. Siemens-Schuckertwerke. Generator; 150 KW, 500 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$	
Polbogen	$b_i = 26$ cm	
Polschuhlänge	$l_p = 31$ „	
Kernquerschnitt	$Q_m = 530$ cm²	
Jochquerschnitt	$Q_j = 700$ „	

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungszahl pro Spule = 800
Drahtdurchmesser $\phi = 3{,}1$ mm.

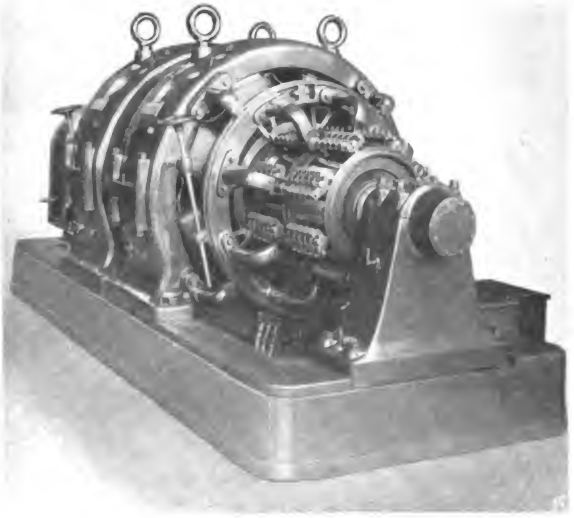


Fig. 267. Siemens-Schuckertwerke. Zusatzaggregat.

Fig. 267 zeigt ein Zusatzaggregat derselben Firma. Die Maschinen laufen mit 385 Umdr. pro Min. Der Generator leistet 2330 Amp. bei 120 Volt, der Motor 410 PS bei 180 Volt. Die Bürstenbrille wird vom Joch aus von vier Rollen getragen, wodurch sie leicht beweglich ist. Die Bürstenstifte werden in der Mitte gefaßt.

Digitized by Google

Fig. 268 zeigt einen direkt mit einer Dampfmaschine gekuppelten Generator. Die Maschine leistet 528—600 KW bei 110 Umdr. pro Min. und 440—500 Volt Klemmenspannung. Der Kommutator ist auf die Ankernabe aufgesetzt.

Fig. 268. Siemens-Schuckertwerke. Generator für Kupplung mit Dampfmaschine, 528—600 KW, 110 Umdr. pro Min.

7. Ganz'sche Electricitäts-Actien-Gesellschaft. Generator, 107,5 KW, 225 Umdr. pro Min. 500 Volt, 215 Amp. (Fig. 269 u. 270.)

Die Ankerbleche werden durch einen kräftigen, doppelarmigen, gußeisernen Stern getragen, auf dessen verlängerter Nabe der Kommutator aufgesetzt ist. Die Pole bestehen aus Blech und sind mittelst eines keilförmigen, schmiedeeisenen Stückes an das Joch verschraubt. Die Bürstenhalter sind Reaktionshalter. Diese wurden auf Seite 61 näher erörtert. Der Bürstenring wird durch einen an das Joch angegossenen Ring geführt. Das Joch ist aus Stahlguß.

Zur Untersuchung dieser Type wurden zwei gleiche Dynamos miteinander mechanisch gekuppelt und nach der Zurückarbeitungsmethode belastet. Da die Maschinen zur direkten Kupplung mit einer stehenden Dampfmaschine bestimmt sind und die Dynamo

Digitized by Google

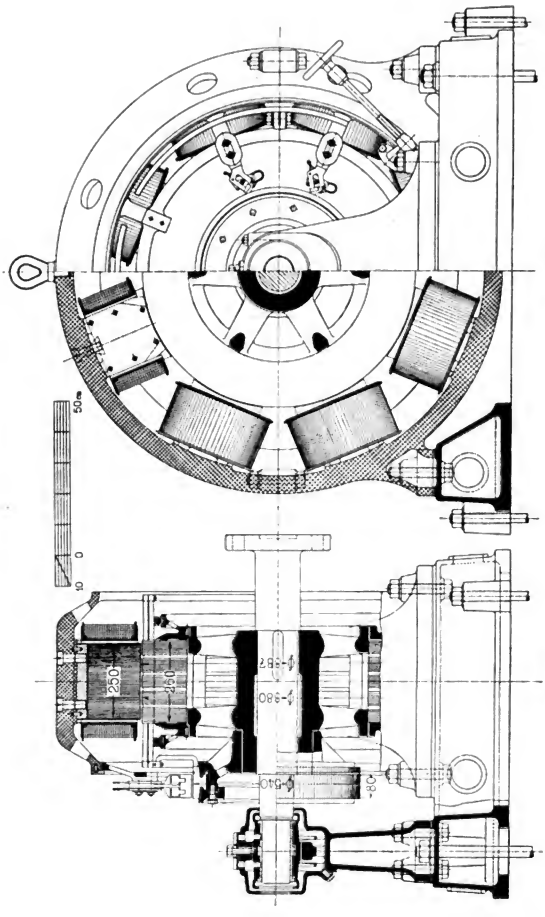


Fig. 269. Fig. 270.

Fig. 269 und 270. Ganz'sche Electrizitäts-Action-Gesellschaft. Generator, 107,5 KW. 225 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

unmittelbar neben dem Schwungrad läuft, so wird die Übertemperatur im gewöhnlichen Betriebe durch die wesentlich größere Ventilation geringer sein, als es bei dem Probeversuche der Fall war, um so mehr, als die beiden Armaturen sehr nahe zueinander montiert waren.

Sämtliche Messungen wurden nach erreichter konstanter Endtemperatur vorgenommen.

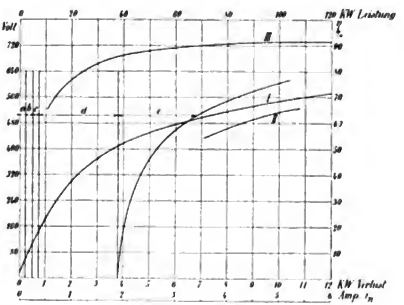


Fig. 271.

I Leerlaufcharakteristik bei 225 Umdr. pro Min.
II Belastungscharakteristik bei 225 Umdr. pro Min. $J = 215$ Amp.
III Wirkungsgradkurve.
$a = 200$ Watt, Lager- und Luftreibung.
$b = 350$ Watt, Bürstenreibung des Motors.
$c = 350$ Watt, Bürstenreibung des Generators
$d = 2900$ Watt, Eisenverluste des Motors bei 500 Volt
e = Eisenverluste des Generators.

Die Eisen- und Reibungsverluste wurden auf folgende Weise bestimmt: Die eine Maschine wurde als Motor geschaltet, mit konstanter Spannung von einer Akkumulatorenbatterie gespeist und die Tourenzahl durch Regulieren der Erregung konstant gehalten. Der Energieverbrauch des Motors wurde gemessen, während die andere Maschine leer als Dynamo erregt, dann in unerregtem Zustande und schließlich mit abgehobenen Bürsten lief. Die Bürstenübergangsverluste wurden nach den mit diesen Bürsten ausgeführten Versuchen berechnet.

Dieser Versuch wurde beiderseitig ausgeführt und ergab für beide Maschinen genau die gleichen Verluste. Die zur Bestimmung des Wirkungsgrades aus den Meßresultaten berechneten Verluste

Digitized by Google

stimmten in Summe praktisch genau überein mit der Energie, die bei der Belastung — nach der obenerwähnten Methode — von der äußeren Stromquelle zugeführt werden mußte.

Nach siebenstündiger Vollast betrug die Übertemperatur der Ankerwicklung und Magnetwicklung beim Motor (aus Widerstandszunahme gemessen) 66° C bezw. 63° C und bei der Dynamo 63,5° C bezw. 70,5° C.

Fig. 271 zeigt die Leerlauf- und Belastungscharakteristik, die Eisenverluste in Abhängigkeit von der Spannung und die Wirkungsgradkurve der Dynamo.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 17.)

Anker:

Durchmesser	$D = 88$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 26$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 22$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 10{,}9$ „

Wicklung:

Reihenwicklung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 630$
Leiterabmessungen	$2{,}8 \times 14$ mm
Nutenzahl	$Z = 63$
Nutenabmessungen	$= 20{,}5 \times 39$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 54$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 8$ „
Lamellenzahl	$K = 315$

Bürsten:

Material	Kohle
Bürstenstifte	8
Bürsten pro Stift	2
Bürstenabmessungen	$1{,}2 \times 3{,}75$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 8$
Polbogen	$b_i = 26$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 25$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 490$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 200$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 1520$
Drahtdurchmesser	$= \phi\, 1{,}8/2{,}0$ mm.

8. **Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Motorgenerator, 350 KW, 500 Umdr. pro Min.** 260 Volt, 1350 Amp. (Fig. 272 und 273.)

Dieses Aggregat dient zur Umformung von Dreiphasenstrom von 10000 Volt verketteter Spannung in Gleichstrom von 260 Volt Spannung. Es ist ohne Mittellager ausgeführt. Der Anker und der Kommutator sind einzeln auf die Welle aufgesetzt. Die Kommutatorbüchse ist zur besseren Ventilation mit axialen Löchern versehen. Die Parallelwicklung ist mit sechs Ausgleichsystemen ausgerüstet, welche hinter den Fahnen auf der verlängerten Kommutatorbüchse gelagert sind.

Joch und Magnetkerne sind aus Stahlguß, die Polschuhe aus Blech. Die Bürstenstifte sind sehr fest gelagert. Ein Bild dieser Bürstenbrille im größeren Maßstabe zeigt Fig. 110, Seite 65.

Digitized by Google

Fig. 272.

Fig. 273.

Fig. 272 und 273. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Motorgenerator, 350 KW, 500 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Hauptdaten der Gleichstrommaschine.

(Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 19.)

Anker:		Bürsten:	
Durchmesser	$D = 105$ cm	Material	Kohle
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 31{,}5$ „	Anzahl der Stifte	8
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 28{,}5$ „	Bürsten pro Stift	12
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 23{,}3$ „	Bürstenabmessungen	$1{,}6 \times 3{,}0$ cm
Wicklung:		**Magnetgestell:**	
Parallelwicklung	$a = 4$	Polzahl	$2p = 8$
Leiterzahl	$N = 360$	Polbogen	$b_i = 28{,}5$ cm
Leiterquerschnitt	$2\,(2{,}5 \times 11)$ mm	Polschuhlänge	$l_p = 30$ „
Nutenzahl	$Z = 90$	Kernquerschnitt	$Q_m = 615$ cm²
Nutenabmessungen	$= 14 \times 32$ mm	Jochquerschnitt	$Q_j = 400$ „
Kommutator:		**Nebenschlußwicklung:**	
Durchmesser	$D_k = 48$ cm	Schaltung der Spulen: Serie	
Nutzbare Länge	$L_k = 42$ „	Windungen pro Spule = 1000	
Lamellenzahl	$K = 180$	Drahtdurchmesser	$\phi = 2{,}9/3{,}3$ mm.

Die Maschine arbeitet funkenfrei, obwohl der Wert $e_s = 0{,}61$ Volt ziemlich hoch ist. Es ist $\Delta e_v = 3{,}2$ Volt.

9. Maschinenfabrik Oerlikon. Umformer, 560 KW, 333 Umdr. pro Min. 160 Volt, 3500 Amp. (Tafel I.)

Diese Umformergruppe wurde für die Filiale Lend (Kraftübertragungsanlage Rauris-Lend, Österreich) der Aluminium-Industrie-Aktiengesellschaft Neuhausen gebaut. Sie zeigt eine Anordnung mit vertikaler Welle, welche feststeht, während die Maschinen auf eine Büchse montiert sind, die um die Welle rotiert. Zur Führung der Büchse dienen zwei Gleitlager, während der vertikale Druck durch einen Spurring aufgenommen wird. Der Spurring ist entlastet, indem unter den Ring Öl eingepreßt wird. Das Öl wird durch eine Pumpe geliefert, die mittelst Zahn- und Schneckenrades von der Hauptwelle aus angetrieben wird. Für die Kühlung des Öles sind Kühlschlangen angeordnet.

Die eigenartige Konstruktion mit feststehender Welle ermöglicht eine geringe Konstruktionshöhe; nachteilig ist jedoch dabei die erschwerte Zugänglichkeit der Lager und die hinsichtlich der Abkühlung etwas ungünstige Lage des Kommutators. Die Gleichstrommaschine ist mit Äquipotentialverbindungen nach dem Schema Fig. 203 ausgerüstet.

Digitized by Google

Der Bürstenträger ist an Konsolen am Magnetgestell aufgehängt und auf Kugeln gelagert. Er ist dadurch leicht drehbar; ferner ist eine Vorrichtung zum Abheben der Bürsten vorhanden, wie das Handrad rechts unten am Bürstenträger erkennen läßt.

Die Konstruktion des Kommutators wurde schon auf Seite 51 erörtert.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 21.)

Anker:

Durchmesser	$D = 150$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 40$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 37{,}5$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 14{,}8$ „

Wicklung:

Zweifache Parallelwicklung	$a = 12$
Leiterzahl	$N = 816$
Leiterabmessungen	$2\,(3 \times 17)$ mm
Nutenzahl	$Z = 204$
Nutenabmessungen	12×42 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 90$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 60$
Lamellenzahl	$K = 408$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	12
Bürsten pro Stift	19
Bürstenabmessungen	$1{,}8 \times 3{,}0$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 12$
Polbogen	$b_i = 26$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 38$ „
Kernquerschnit	$Q_m = 540$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 575$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 350$
Drahtdurchmesser	$\phi = 5{,}5/5{,}6$ mm.

10. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 210 KW 120 Umdr. pro Min. 260—350 Volt, 800—600 Amp. (Fig. 274 u. 275.)

Diese Maschine ist direkt mit einer Wasserturbine gekuppelt und mit vertikaler Welle ausgeführt. Die beiden Führungslager werden durch Tragarme gehalten. Die unteren Tragarme sind an ein als Sockel für das Joch dienendes Gehäuse angegossen. Joch und Magnetkerne sind aus Stahlguß als ein Stück gegossen. Die lamellierten Polschuhe sind angeschraubt. Die Feldspulen sind zur besseren Abkühlung unterteilt. Die Konstruktion des Ankerkörpers und des Kommutators zeigt dieselbe Ausführung, wie bei der Maschine für 400 KW und 125 Umdr. pro Min. (Fig. 280 und 281) derselben Firma. Am oberen Armsystem ist der Bürstenhalterring mittelst Kegel- und Zahnrades drehbar angeordnet. Die Maschine ist mit Äquipotentialverbindungen versehen, welche als Gabeln hinter dem Kommutator ausgeführt sind.

Digitized by Google

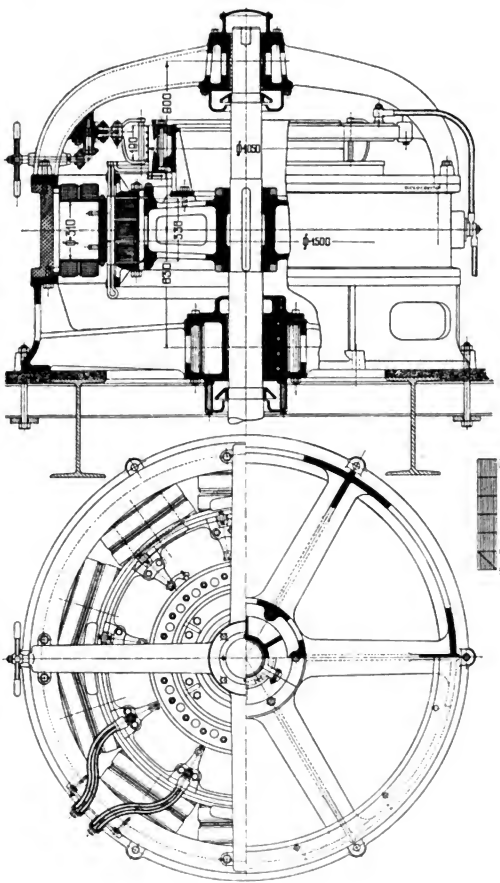


Fig. 274. Fig. 275.

Fig. 274 und 275. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 210 KW, 120 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 23.)

Anker:

Durchmesser	$D = 150$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 33{,}8$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 31{,}8$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 13{,}5$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 5$
Leiterzahl	$N = 1560$
Leiterquerschnitt	$= 1{,}8 \times 16$ mm
Nutenzahl	$Z = 195$
Nutenabmessungen	$= 12{,}5 \times 40$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 105$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 19$ „
Lamellenzahl	$K = 390$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	10
Bürsten pro Stift	5
Bürstenabmessungen	$1{,}37 \times 3$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 10$
Polbogen	$b_i = 33{,}5$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 33{,}8$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 755$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 390$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 700$
Drahtdurchmesser	$\phi = 4{,}4$ mm.

11. **Maschinenfabrik Oerlikon. Generator, 600 KW, 276 Umdr. pro Min.** 560 Volt, 1070 Amp. (Fig. 276 und 277.)

Der Rahmen ist mit den Lagerständern aus einem Stück gegossen. Anker und Kommutator sind je für sich auf die Welle aufgekeilt. Die Kommutatorlamellen werden durch schmiedeeiserne Segmente festgehalten. Die Maschine ist mit Ausgleichverbindungen nach dem in Fig. 203 dargestellten Schema versehen. Die Schienen, welche die gleichnamigen Bürstensätze verbinden, sind durch Kappen gegen Berührung geschützt. Die Magnetkerne und Polschuhe sind aus einem Blechstück gestanzt und mit dem Stahlgußjoch verschraubt.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 25.)

Anker:

Durchmesser	$D = 150$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 40$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 37{,}5$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 15{,}1$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 5$
Leiterzahl	$N = 1120$
Leiterquerschnitt	$= 2{,}5 \times 16$ mm
Nutenzahl	$Z = 280$
Nutenabmessungen	$= 8{,}5 \times 39$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 104$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 32$ „
Lamellenzahl	$K = 560$

Digitized by Google

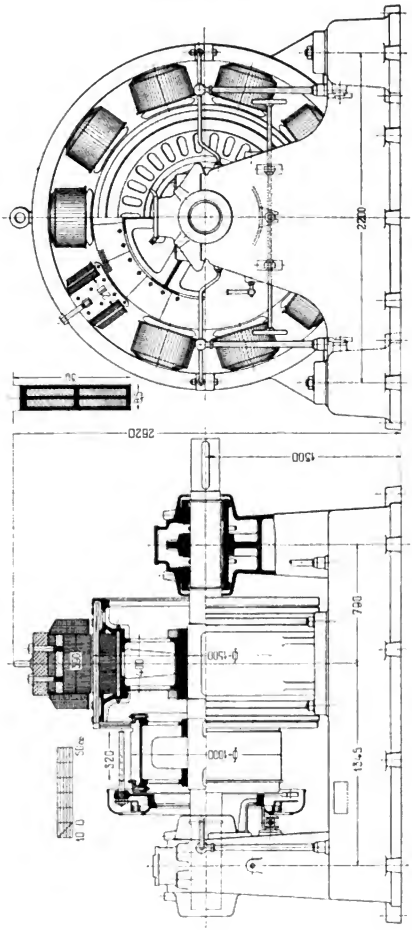


Fig. 276.

Fig. 277.

Fig. 276 und 277. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator, 600 KW, 276 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	10
Bürsten pro Stift	10
Bürstenabmessungen	1,0×3,0 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 10$
Polbogen	$b_i = 32$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 39$ cm
Kernquerschnitt	$Q_m = 740$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 420$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	= 1270
Drahtdurchmesser	$\varphi = 3{,}6/4{,}0$ mm.

12. **Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Generator, 275 KW, 125 Umdr. pro Min.** 62,5 Volt, 4400 Amp. (Fig. 278 und 279.)

Die Maschine ist entsprechend der hohen Stromstärke mit zwei Kommutatoren ausgeführt, denen der Strom von zwei voneinander unabhängigen Schleifenwicklungen ($a = p = 8$) zugeführt wird. Die Nabe des doppelarmig ausgebildeten Ankerkörpers ist gesprengt und mit Schrumpfringen zusammengehalten. Bei der Konstruktion des Ankers, der Kommutatoren, sowie bei der Anordnung der Wicklung ist für möglichst freien Luftzutritt und gute Kühlung Sorge getragen. Das Ankereisen ist mit zwei radialen Luftschlitzen versehen. Die Kommutatoren sind besonders auf die Welle gekeilt und vom Anker durch je zwei Schrauben distanziert. Die Bürstenhalterringe aus kupferhaltiger Bronze haben T-förmigen, bis zur Ableitungsstelle zunehmenden Querschnitt. Die Bürstenstifte werden von angegossenen Klemmstücken gehalten. In den Ableitkabelschuhen sind je sieben flexible Kabel eingelötet.

Die Magnetpole sind an das Stahlgußjoch angegossen. Die Polschuhe sind an der Eintrittskante abgeschrägt.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 26.)

Anker:

Durchmesser	$D = 175$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 32$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 29{,}6$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 16{,}5$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 8$
Leiterzahl	$N = 2\times544$
Leiterquerschnitt	= 3,5×18 mm
Nutenzahl	$Z = 272$
Nutenabmessungen	= 10×45 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 85$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 2\times26.5$ cm
Lamellenzahl	$K = 2\times272$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	2×16
Bürsten pro Stift	9
Bürstenabmessungen	2,5×2,4 cm

Digitized by Google

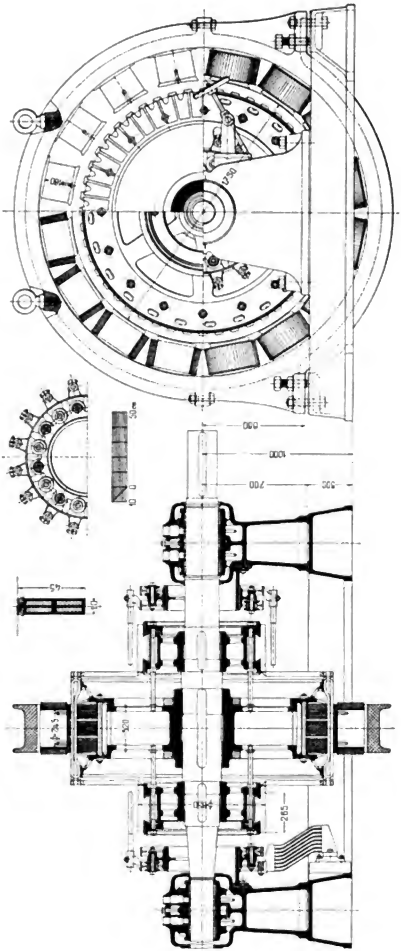


Fig. 278. Fig. 279.

Fig. 278 und 279. Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. Kolben & Co. Generator, 275 KW, 125 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 16$
Polbogen	$b_i = 27$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 32$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 470$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 272$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 143
Drahtabmessungen = 6×6 mm.

13. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 270 KW, 100 Umdr. pro Min. 115 Volt, 2390 Amp. (Tafel II.)

Der einteilige gußeiserne Ankerkörper dieser Maschine ist mit sechs kräftigen Armen von elliptischer Querschnittsform versehen und mittelst zweier um 180° versetzter Tangentialkeile auf der Welle befestigt. Die beiden Ankerpreßringe mit den angegossenen Wicklungsträgern sind ebenfalls aus Gußeisen und durch zwei gegenüberliegende Flachkeile gegen Verdrehung auf dem Radkranz gesichert. Die Ankerbleche werden durch 24 Schraubenbolzen gehalten und zusammengepreßt. Drei Luftschlitze, sowie der freigelegte innere Umfang und teilweise auch die beiden Seitenflächen des Ankerkernes ermöglichen eine sehr gute Abkühlung. Der Radkranz enthält zur besseren Luftzirkulation zwölf längliche Schlitze.

Der Anker hat eine Schleifenwicklung mit vier Stäben pro Nut. Sechs Ausgleichsringe liegen auf der hinteren Seite des Kommutators. Dieser ist auf eine Verlängerung der Ankerkörpernabe aufgekeilt.

Die Bürstenstifte werden von kräftigen Bügeln gehalten, die ihrerseits in einem gemeinsamen zweiteiligen Ring isoliert eingesetzt sind. Dieser Ring ist in einer Anzahl Rollen zwecks Bürstenverstellung leicht drehbar. Die Rollen sind an Armen befestigt, die an das Joch angeschraubt sind.

Die Polkerne bestehen aus Schmiedeisen, die Polschuhe aus Eisenblech. Die Polspitzen sind auf der Eintrittsseite stark gesättigt, indem bei der Hälfte der Bleche die Spitze abgeschnitten ist.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 27.)

Anker:

Durchmesser	$D = 195$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 31$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 28$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 14{,}5$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 8$
Leiterzahl	$N = 960$
Leiterquerschnitt	= 4×14 mm
Nutenzahl	$Z = 240$
Nutenabmessungen	= 11,5×35 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 130$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 35$ „
Lamellenzahl	$K = 480$

Digitized by Google

Bürsten:	
Material	Kohle
Anzahl der Stifte	16
Bürsten pro Stift	10
Bürstenabmessungen	1,6×3,0 cm

Magnetgestell:	
Polzahl	$2p = 16$
Polbogen	$b_i = 27$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 31$ cm
Kernquerschnitt	$Q_m = 530$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 660$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 255
Drahtdurchmesser $\phi = 6{,}5$ mm.

14. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 400 KW, 125 Umdr. pro Min. 240 Volt, 1670 Amp. (Fig. 280 und 281.)

Der Ankerkörper zeigt eine kräftige Konstruktion, welche eine gute Ventilation des Kernes ermöglicht. Die Wicklung ist als Reihenparallelschaltung mit $a = p$ ausgeführt. Auf der Kommutatorseite ist jeder Knotenpunkt der Wicklung an zwei Lamellen, welche um den Potentialschritt $y_p = \frac{K}{a} = \frac{615}{5} = 123$ entfernt liegen, angeschlossen. Das Schema dieser Ausgleichverbindungen und die Details der Wicklung zeigt Fig. 177, S. 103.

Die kurzen Pole ergeben eine große Wicklungshöhe, welche ihrerseits die Abkühlungsfähigkeit der Magnetspulen vermindert. Die Spulen sind deshalb unterteilt. Die Polspitzen an der Eintrittsseite der lamellierten Polschuhe sind bei der Hälfte der Bleche abgeschnitten, um diese stark zu sättigen.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 30.)

Anker:	
Durchmesser	$D = 183$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 34$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 32$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 14{,}6$ „

Wicklung:	
Reihenparallelwicklung	$a = 5$
Leiterzahl	$N = 1230$
Leiterquerschnitt	$= 1{,}6 \times 38{,}5$ mm
Nutenzahl	$Z = 205$
Nutenabmessungen	$= 15 \times 44$ mm

Kommutator:	
Durchmesser	$D_k = 131$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 30$ „
Lamellenzahl	$K = 615$

Bürsten:	
Material	Kohle
Anzahl der Stifte	10
Bürsten pro Stift	9
Bürstenabmessungen	2,0×3,0 cm

Magnetgestell:	
Polzahl	$2p = 10$
Polbogen	$b_i = 39$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 34{,}6$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 710$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 340$ „

Digitized by Google

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie Windungen pro Spule = 520

Drahtdurchmesser $\phi = 4{,}6$ mm.

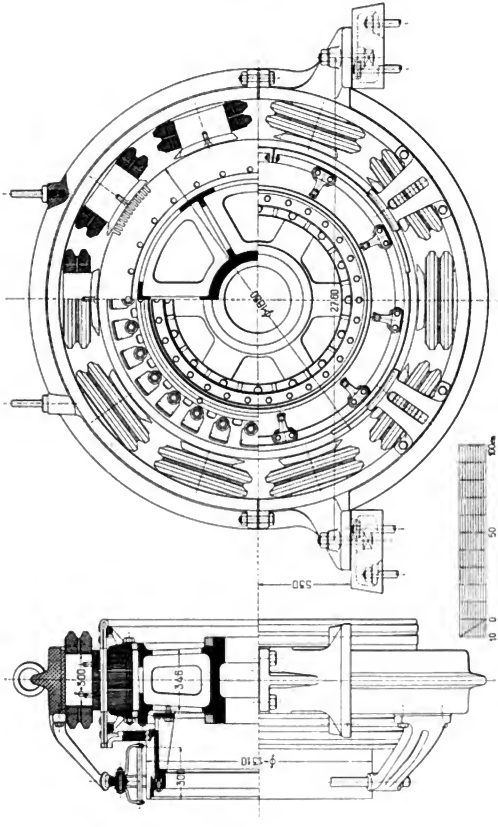


Fig. 280.

Fig. 281.

Fig. 280 und 281. Compagnie Générale Electrique, Nancy. Generator, 400 KW, 125 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

15. **Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth, Münchenstein-Basel. Generator, 900 KW, 100 Umdr. pro Min.** 500—600 Volt, 1800—1500 Amp. (Tafel III.)

Der Ankerstern und die Preßplatten dieser Maschine sind aus Gußeisen. Die Preßplatten bestehen aus einzelnen Gußstücken, sie werden durch Schrauben, die durch die Bleche gehen, zusammengepreßt. Die Wicklung ist als Parallelwicklung ausgeführt und mit Äquipotentialverbindungen versehen.

Die Magnete und das Joch bestehen aus Stahlguß und sind in einem Stück gegossen. Das Joch ist als Hohlguß ausgeführt, um eine genügende Steifheit gegen Durchbiegung zu erhalten. Die Bürstenbrille wird durch an das Joch angeschraubte Arme geführt und die Bürstenstifte sind so eingerichtet, daß die Bürsten leicht abgehoben werden können (siehe Fig. 115, S. 68).

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 32.)

Anker:

Durchmesser	$D = 300$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 39$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 35$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 31{,}4$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 7$
Leiterzahl	$N = 2100$
Leiterabmessungen	$= 2{,}5 \times 14$ mm
Nutenzahl	$Z = 350$
Nutenabmessungen	$= 13{,}6 \times 36$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 200$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 37$ „
Lamellenzahl	$K = 1050$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	14
Bürsten pro Stift	10
Bürstenabmessungen	$1{,}6 \times 3{,}0$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 14$
Polbogen	$b_i = 48$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 37{,}8$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 1250$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 675$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 988$
Drahtdurchmesser	$\phi = 4{,}8/4{,}3$ mm.

16. **Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi. Fördermotor, 280 PS, 0—30 Umdr. pro Min.** 0—200 Volt, 1000—2000 Amp. (Fig. 282 u. 283.)

Dieser Motor ist direkt gekuppelt mit der Welle einer Fördertrommel. Der Ankerstern und die Preßplatten sind aus Stahlguß, ebenso das Joch und die Pole. Der Kommutator ist an das Armsystem des Ankers angeschraubt. Bemerkenswert ist die Bürsten-

Digitized by Google

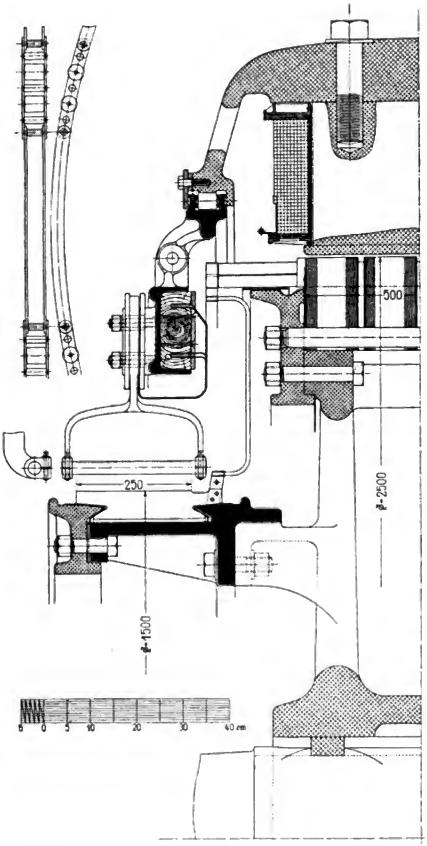


Fig. 282. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi. Fördermotor, 280 PS, 0—30 Umdr. pro Min.

verstellvorrichtung. Die Bürstenstifte sind an einem gußeisernen Ring befestigt, welcher auf seinem ganzen Umfang von Rollen geführt wird. Die Rollen werden durch Ringsegmente, welche unter-

Digitized by Google

einander gelenkig verbunden sind, in einem bestimmten Abstand gehalten und anderseits durch einen an das Joch angegossenen Ring geführt.

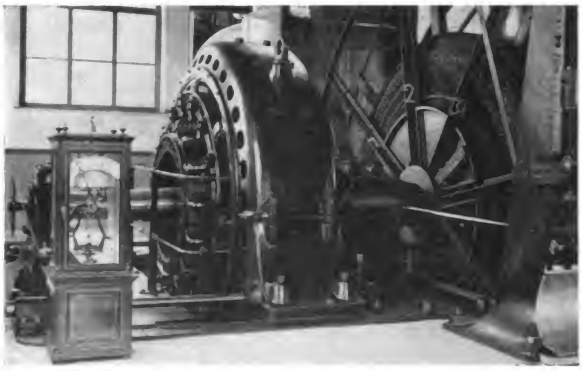


Fig. 283. Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi. Fördermotor, 280 PS, 0—30 Umdr. pro Min.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 79 Nr. 7.)

Anker:

Durchmesser	$D = 250$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 50$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 46{,}25$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 13{,}7$ „

Wicklung:

Reihenparallelwicklung	$a = 2$
Leiterzahl	$N = 756$
Leiterabmessungen	8×25 mm
Nutenzahl	$Z = 189$
Nutenabmessungen	21×63 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 150$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 21$ „
Lamellenzahl	$K = 378$

Bürten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	16
Bürsten pro Stift	4
Bürstenabmessungen	2×4 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 16$
Polbogen	$b_i = 32$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 50$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 1260$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 780$ „

Magnetwicklung:

Fremderregung 110 Volt:
Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 321
Drahtdurchmesser
$\phi = 6{,}0/6{,}5$ mm.

Digitized by Google

17. Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf. Hochspannungsgenerator, 270 KW, 300 Umdr. pro. Min. 3600 Volt, 75 Amp. (Fig. 284 u. 285.)[1])

Die Maschine ist ein Hauptschlußgenerator und ist in der Serie-Kraftübertragungsanlage von Moutiers nach Lyon in Betrieb. Eine verfügbare Leistung von 6300 PS wird mit einer Luftleitung von 180 km Länge nach Lyon übertragen. Im Kraftwerk stehen vier Einheiten, von denen jede aus zwei Doppelmaschinen besteht, so daß im Ganzen 16 Gleichstrommaschinen vorhanden sind. Da der höchste vorkommende Spannungsunterschied zwischen Maschine und Erde 60000 Volt betragen kann, so ist auf die Isolierung der Wicklung und des Kommutators gegen Gehäuse und Erde besondere Sorgfalt verwendet. Kommutator und Ankerkörper sind isoliert auf einer gemeinsamen Nabe aufgeschraubt. Außerdem stehen die Maschinen noch auf Zapfen, die in Doppelglockenisolatoren eingekittet sind.

Die Ankerwicklung ist aus Schablonenspulen hergestellt und liegt in Nuten. Sie ist als Reihenschaltung mit vermehrter Lamellenzahl ausgeführt, und zwar beträgt die Lamellenzahl das p-fache der Spulenzahl. (Bd. I, S. 119, Fig. 123.) Die Verbindungen der Lamellen sind seitlich am Kommutatorkörper angebracht.

Das Gehäuse ist sechspolig, aus Stahlguß mit angegossenen Polen. Die Polschuhe sind lamelliert. Die Feldspulen sind auf Zinkrahmen aufgewickelt und alle Verbindungsleitungen auf Porzellanisolatoren verlegt.

Bemerkenswert sind auch die elastischen Kupplungen zwischen Dynamos und Turbine und den Dynamopaaren unter sich. Die äußere Muffe ist nicht aus einem Stück, sondern setzt sich aus einer mit Zugfingern versehenen Scheibe zusammen, die konzentrisch zur Nabe gleiten können; der Innenrand der Scheibe ist mit dem Außenrand der Nabe durch ein ringförmiges Stück mit 32 Bolzen verbunden, auf welchen zwischen Außen- und Innenrand Federn sitzen. Diese federnde Verbindung zwischen Außen- und Innenteil der Kupplung ist so eingestellt, daß unter dem Einfluß des normalen Drehmomentes eine Verschiebung der Scheibe nicht eintreten kann; sobald aber das Drehmoment einen übermäßigen Wert annimmt, etwa durch Kurzschluß auf der Strecke, wird die Scheibe gleiten. Auf diese Weise wird jede Zerstörung der Kupplungsriemen oder gar der Anker selbst durch heftige plötzliche Stöße vermieden.

Die Änderung der Spannung geschieht durch Änderung der Tourenzahl der Turbine. Die Stromstärke und somit auch die

[1]) ETZ 1906. S. 1091.

Digitized by Google

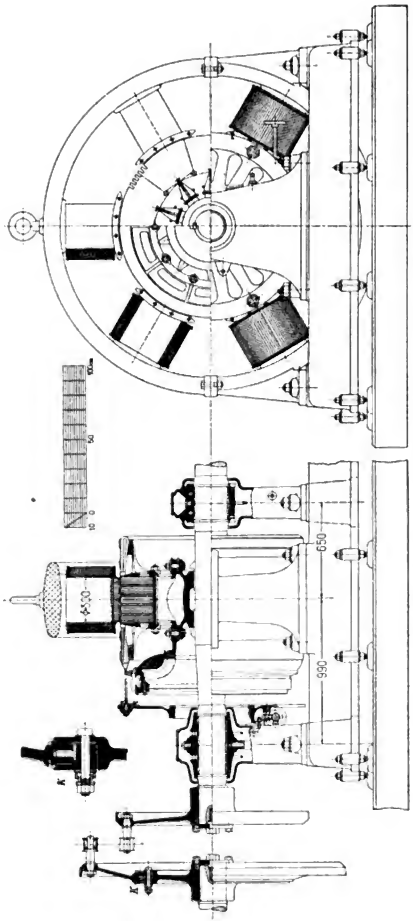


Fig. 284. Fig. 285.

Fig. 284 und 285. Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf. Hochspannungsgenerator, 270 KW, 300 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Feldverteilung ist für alle Belastungen die gleiche. Die Bürsten lassen sich daher so einstellen, daß die Kurzschlußspannung gleich Null wird.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:		Bürsten:	
Durchmesser	$D = 123{,}2$ cm	Material	Kohle
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 32$ „	Anzahl der Stifte	6
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 28$ „	Bürsten pro Stift	2
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 22$ „	Bürstenabmessungen	$0{,}8 \times 3{,}0$ cm
Wicklung:		**Magnetgestell:**	
Reihenschaltung	$a = 1$	Polzahl	$2p = 6$
Leiterzahl	$N = 1992$	Polbogen	$b_i = 44$ cm
Leiterdurchmesser	$\phi = 3{,}8$ mm	Polschuhlänge	$l_p = 30$ „
Nutenzahl	$Z = 111$	Kernquerschnitt	$Q_m = 700$ cm^2
Nutenabmessungen	$= 18 \times 36$ mm	Jochquerschnitt	$Q_j = 500$ „
Kommutator:		**Wicklung:**	
Durchmesser	$D_k = 110$ cm	Hauptschluß	
Nutzbare Länge	$L_k = 7{,}5$ „	Schaltung der Spulen: Serie	
Lamellenzahl	$K = 996$	Windungen pro Spule $= 229$	
		Drahtdurchmesser	$\phi = 9{,}4$ mm.

Hieraus ergeben sich folgende charakteristischen Größen:

Induzierte Spannung bei Vollast	$E_a = 3736$ Volt
Luftinduktion bei Vollast	$B_l = 9150$
Maximale Zahninduktion bei Vollast	$B_{z\,max} = 26600$
Ankerinduktion bei Vollast	$B_a = 11300$
Magnetinduktion bei Vollast	$B_m = 15000$
Jochinduktion bei Vollast	$B_j = 14400$
Spezifische Ankerbelastung bei Vollast	$AS = 193$
Ankergeschwindigkeit	$v = 19{,}4$ m/sec
Kommutatorgeschwindigkeit	$v_k = 17{,}3$ m/sec
Lamellenteilung	$\beta = 3{,}46$ mm
Maximale Spannung zwischen benachbarten Lamellen	$P_{dk} = 34$ Volt

$$\text{Ankerkonstante } \frac{N}{K} l_i v\, AS \cdot 10^{-6} = 0{,}695.$$

18. **Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Compound-Regulier-Dynamo, 0—75 KW, 680 Umdr. pro Min.** 0—220 Volt, 345 Amp. (Fig. 286 bis 288.)

Die Maschine ist als Lagerschildtype gebaut. Das Lager

Digitized by Google

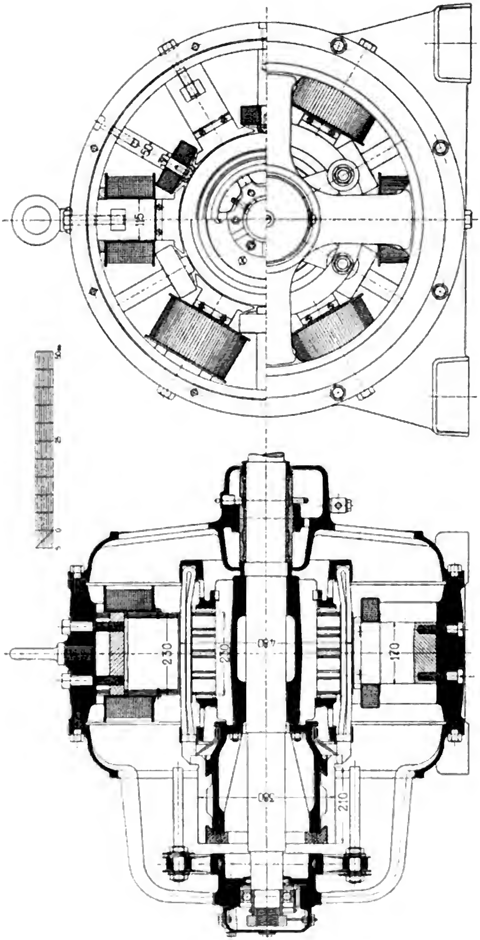


Fig. 287.

Fig. 286.

Fig. 286 und 287. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Compound-Regulier-Dynamo, 0—75 KW, 680 Umdr. pro Min.

auf der Riemscheibenseite, welches die größten Kräfte aufzunehmen hat, ist als Gleitlager ausgebildet, während die Kommutatorseite ein Kugellager besitzt. Die eine Preßplatte der Ankerbleche ist mit dem Stern aus einem Stück gegossen, während die andere durch einen Bajonettverschluß gehalten wird. Die Wicklung ist mit Äquipotentialverbindungen versehen.

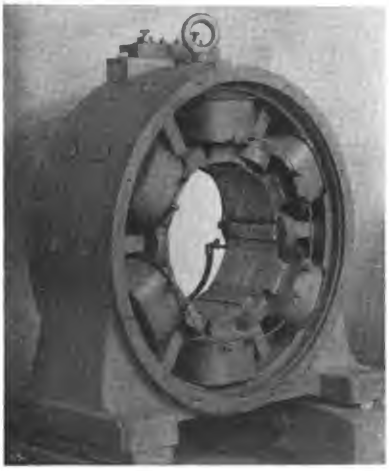


Fig. 288. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Compound-Regulier-Dynamo, 0—75 KW, 680 Umdr. pro Min.

Die Maschine hat Wendepole, welche nach der auf Seite 120 beschriebenen Weise angeordnet sind. Um Platz für die Nebenschlußwicklung zu erhalten, sind die Polkerne schmal und hoch gemacht. Es wird hierdurch eine gute Abkühlung der Wendepol- und Nebenschlußwicklung erzielt. Die Hauptpole sind aus Blech, die Wendepole aus Schmiedeeisen und das Joch aus Gußeisen. Eine siebenstündige Dauerprobe mit 230 Volt und 715 Touren ergab folgende Temperaturen:

Anker . . . im Mittel	44° C
Kommutator	43° C
Magnete	42° C.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 78 Nr. I.)

Anker:

Durchmesser	$D = 48$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 23$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 20$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 6{,}2$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 3$
Leiterzahl	$N = 612$
Leiterabmessungen	1×15 mm
Nutenzahl	$Z = 102$
Nutenabmessungen	$6{,}2 \times 38$ mm

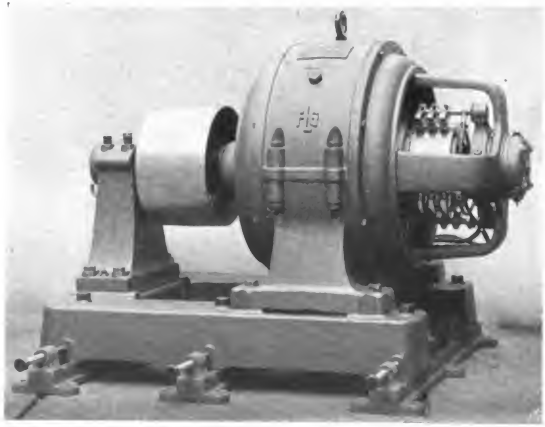


Fig. 289. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Normales Modell für 11—100 KW.

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 38$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 14{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 306$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	6
Bürsten pro Stift	4
Bürstenabmessungen	$1{,}5 \times 3$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$
Polbogen	$b_i = 19{,}4$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 23$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 252$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 260$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 1000$
Drahtdurchmesser	$\phi = 2{,}3/2{,}6$ mm

Digitized by Google

Hauptschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Windungen pro Spule $= 5^1/_2$
2×3 Spulen in Serie	Drahtabmessungen $8{,}5 \times 10$ mm.

Wendepole.

Polbogen	$b_w = 2{,}5$ cm	Schaltung der Spulen: Serie
Polschuhlänge	$l_w = 17$ „	Windungen pro Spule $= 11$
Kernquerschnitt		Leiterabmessungen 4×45 mm.
$Q_{w\,m} = 51$ u. 85 cm^2		

Fig. 289 zeigt ein normales Modell der Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke für Maschinen von 11—100 KW bezw. von 12,5 bis 125 PS. Dieses Modell ist in seinem Aufbau der beschriebenen Wendepolmaschine sehr ähnlich. Die Welle wird auch hier auf der Kommutatorseite von einem Kugellager und auf der Riemscheibenseite von einem Gleitlager getragen.

19. **Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Turbogenerator, 65 KW, 3000 Umdr. pro Min.** 115 Volt, 565 Amp. (Tafel IV.)

Diese mit Wendepolen ausgerüstete Maschine ist direkt gekuppelt mit einer Elektra-Dampfturbine. Die Ankerbleche sitzen direkt auf der Welle und haben außer drei radialen Luftschlitzen noch mehrere axiale rechteckige Schlitze. Die beiden seitlichen Preßplatten haben eine gleiche Anzahl Öffnungen und pressen die Ankerbleche nur mit einzelnen Rippen.

Die als zweifache Parallelwicklung ausgeführte Wicklung liegt in keilverschlossenen, schräg gestellten Nuten. Die Keile sind aus Holz und derartig aus zwei Stücken zusammengeleimt, daß deren Fasern senkrecht zueinander stehen. Die Stirnverbindungen sind durch übergeschobene Bronzekappen gegen die Wirkung der Fliehkraft geschützt. Sie werden mittelst geschlitzter konischer Ringe an diese Bronzekappen gepreßt. Die Wicklung ist mit fünf Ausgleichsystemen versehen. Diese sind als Bandagen, welche auf dem hinteren Schrumpfringe des Kommutators gewickelt sind, ausgebildet. Jedes System verbindet zwei einander diametral gegenüberliegende Lamellen miteinander. Außerdem sind an einigen Stellen zwei benachbarte Lamellen durch einen Bügel zwischen den Fahnen miteinander leitend verbunden. Diese Verbindungen besorgen den Ausgleich zwischen den beiden parallel geschalteten Wicklungen.

Der Kommutator wird durch vier Schrumpfringe zusammengehalten und mittelst eines Konus auf der Welle befestigt. Die Bürstenstifte sind in kräftigen Bügeln festgeklemmt, welche isoliert an einem zweiteiligen Ringe befestigt sind. Dieser Ring ist mittelst

Digitized by Google

vier Rollen auf jeder Seite drehbar in einem gußeisernen Gestell, das auf der Grundplatte befestigt ist. Die Verstellung der Bürsten erfolgt durch Schraubenspindel und Handrad. Das Magnetgestell ist aus Stahlguß. Die runden schmiedeeisernen Hauptpole und Wendepole sind angeschraubt. Die Polschuhe der Hauptpole sind lamelliert, während diejenigen der Wendepole angeschmiedet sind. Die Länge der letzteren beträgt ca. $^3/_4$ der Ankerlänge, die Breite ca. zwei Zahnteilungen.

Die Hilfspolwicklung ist aus einem Bronzezylinder gewindeartig herausgeschnitten. Auf der Kommutatorseite ist die Maschine durch eine Verschalung ganz abgeschlossen, wogegen die auf der hinteren Seite mit Löchern versehen ist, durch welche die warme Luft entweichen kann. Die Maschine arbeitet bei allen Belastungen vollkommen funkenfrei.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 78 Nr. III.)

Anker:

Durchmesser	$D = 36$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 19$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 16$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 8$ „

Wicklung:

Zweifache Parallelschaltung	$a = 4$
Leiterzahl	$N = 200$
Leiterabmessungen	$= 2{,}5 \times 8$ mm
Nutenzahl	$Z = 50$
Nutenabmessungen	$= 8{,}5 \times 26$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 18$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 39$ „
Lamellenzahl	$K = 100$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	4
Bürsten pro Stift	7
Bürstenabmessungen	$= 1{,}6 \times 3{,}0$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_i = 17$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 17$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 165$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 100$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 1150$
Drahtdurchmesser	$\phi = 2{,}0$ mm.

Wendepole.

Polbogen	$b_w = 4$ cm
Polschuhlänge	$l_w = 14$ „
Kernquerschnitt	$Q_{wm} = 19{,}6$ cm^2
Schaltung der Spulen:	in Serie
Windungen pro Spule	$= 5$
Leiterabmessungen	23×23 mm.

Fig. 290 zeigt eine ähnliche Konstruktion eines Turbogenerators dieser Firma. Diese Maschine leistet 145 KW bei 2200 Umdr. pro

Digitized by Google

Fig. 290. Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Turbogenerator, 145 KW, 2200 Umdr. pro Min.

Fig. 291. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Anker eines Turbogenerators für 35 KW, 3000 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Min., sie ist mit zwei Kommutatoren ausgerüstet und die Bürstenverstellungsvorrichtungen der beiden Kommutatoren sind mechanisch miteinander gekuppelt.

Die Verschalung ist weggenommen, so daß die Anordnung der Haupt- und Wendepole ersichtlich ist. Die Wicklung der Wendepole besteht hier aus Kabeln.

Fig. 291 zeigt einen Anker eines Turbogenerators für 35 KW, 3000 Umdr. pro Min., 110 Volt. Die Ankernuten sind schräg gestellt. Auf der hinteren Seite sind mehrere mit Gewinde versehene Löcher sichtbar, welche zur Anbringung der Gewichte bei der Ausbalancierung dienen.

20. Maschinenfabrik Oerlikon. Turbogenerator, 500 KW, 2000 Umdr. pro Min. 440—550 Volt. (Tafel V u. Fig. 292.)

Die sechspolige Maschine ist mit einer Parallelwicklung mit Äquipotentialverbindungen, welche auf der hinteren Seite des Ankers liegen, versehen. Die Nuten sind geschlossen und enthalten je zwei Stäbe. Der Ankerkörper ist stark unterteilt. Jedes Blechpaket ist 43 mm und der Schlitz 12 mm breit. Der Kommutator ist durch Ringe gegen die Wirkung der Fliehkraft geschützt. Die Ringe werden mittelst konischer Segmente auf den Kommutator festgepreßt. Die Bürstenbrille wird von einem besonderen Ständer getragen. Ihre Lagerung geschieht auf Rollen, so daß die Bürsten sich leicht einstellen lassen. Auf der Ankerseite sind die Bürstenstifte in einem Ringe befestigt, welcher von einigen am Gehäuse angebrachten Rollen getragen wird.

Auf die Ventilation der Maschine ist besondere Sorgfalt verwendet. Die kalte Luft wird unterhalb des Rahmens durch den Kanal *K* von einem Ventilator *V* angesaugt, welcher an den Ankerkörper angeschraubt ist. Die aus dem Ventilator geschleuderte Luft strömt zum Teil durch die Löcher *A* in den Raum, in welchem sich die Magnete befinden. Dieser Raum ist durch Bleche vom Anker ganz getrennt. Die Luft entweicht durch Löcher in der vorderen Verschalung. Ein anderer Teil der vom Ventilator gelieferten Luft strömt durch den Luftraum und bestreicht und kühlt die äußere Ankerfläche. Durch den Zug dieser Luftströmung und durch die Ventilationswirkung der Luftschlitze wird ebenfalls Luft gesaugt. Ein dritter Teil der vom Ventilator gelieferten Luft wird durch einen Kanal unterhalb der Maschine nach dem Kommutator geführt. Mittelst eines hölzernen Mundstücks wird die Luft gegen die Unterkante des Kommutators geblasen. Der Kommutator wird innen noch durch einen besonderen Ventilator gekühlt. Dieser ist zwischen Kommutator und Lager angebracht und saugt die Luft

Digitized by Google

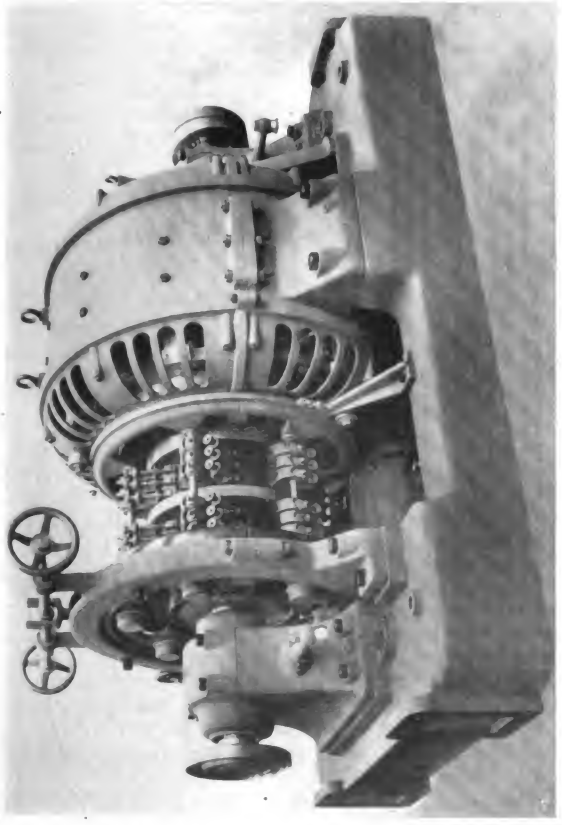


Fig. 292. Maschinenfabrik Oerlikon. Turbogenerator, 500 KW, 2000 Umdr. pro Min.

durch Schlitze *k* in der Welle ebenfalls aus dem Kanal *K* an. Die durch *k* strömende Luft wird durch das Blech *B* gehindert durch den Anker zu entweichen.

Den Bürstenhalter dieser Maschine zeigt Fig. 87b Seite 57.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 78 Nr. IV.)

Anker:

Durchmesser	$D = 80$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 42{,}8$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 34{,}4$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 16$ „

Wicklung:

Parallelwicklung	$a = 3$
Leiterzahl	$N = 420$
Leiterabmessungen	$2{,}8 \times 17$ mm
Nutenzahl	$Z = 210$
Nutenabmessungen	$5{,}8 \times 50$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 40$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 36$ „
Lamellenzahl	$K = 210$

Bürsten:

Material	Endruweit
Anzahl der Stifte	6
Bürsten pro Stift	6
Bürstenabmessungen	$1{,}4 \times 4$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$
Polbogen	$b_i = 27$ cm
Polschuhlänge	$l_\mu = 41$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 252$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 130$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 2610$
Drahtdurchmesser	$\phi = 1{,}8/2{,}2$ mm

Wendepole.

Polbogen	$b_w = 5$ cm
Polschuhlänge	$l_w = 28$ „
Kernquerschnitt	$Q_{wm} = 112$ cm²
Luftraum einseitig	$\delta_w = 10$ mm
Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	10
Leiterabmessungen	$4{,}2 \times 145$ mm

21. **Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Generator, 1100 KW, 94 Umdr. pro Min.** 630 Volt, 1750 Amp. (Taf. VI.)

Diese Maschine ist für direkte Kupplung mit einer Dampfmaschine gebaut. Sie ist mit Wendepolen der bei dieser Firma üblichen Bauart ausgerüstet. Der Kommutator ist an das Armsystem des Ankers angeschraubt. Der Bürstenhalterring wird von einem Ansatz am Lager getragen und ist wie ein Rad mit Armen gebaut. Die Wicklung ist mit Äquipotentialverbindungen versehen. Das Joch besteht aus Gußeisen, die Haupt- und Wendepole aus Stahlguß. Der Querschnitt der Hauptpole ist oval.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt. 78 Nr. II.)

Anker:

Durchmesser	$D = 320$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 30$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 27$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 15{,}2$ „

Wicklung:

Reihenparallelwicklung	$a = 5$
Leiterzahl	$N = 2130$
Leiterabmessungen	2×20 mm
Nutenzahl	$Z = 355$
Nutenabmessungen	$9{,}7 \times 48$ mm

Digitized by Google

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 220$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 19{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 1065$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	20
Bürsten pro Stift	5
Bürstenabmessungen	2×3 cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 20$
Polbogen	$b_i = 34$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 30$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 690$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 750$ „

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	= 780
Drahtdurchmesser	$\phi = 4{,}2/4{,}7$ mm

Wendepole.

Polbogen	$b_w = 3{,}8$ cm	Schaltung der Spulen:	Serie
Polschuhlänge	$l_w = 22{,}5$ „	Windungszahl pro Spule	7
Luftraum	$\delta_w = 0{,}5$ „	Leiterabmessungen	11×80 mm
Kernquerschnitt			
	$Q_{wm} = 88$ u. 132 cm²		

22. **Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft. Motor, 80 PS, 310—620 Umdr. pro Min.** 220 Volt, 300 Amp. (Fig. 293 bis 295.)

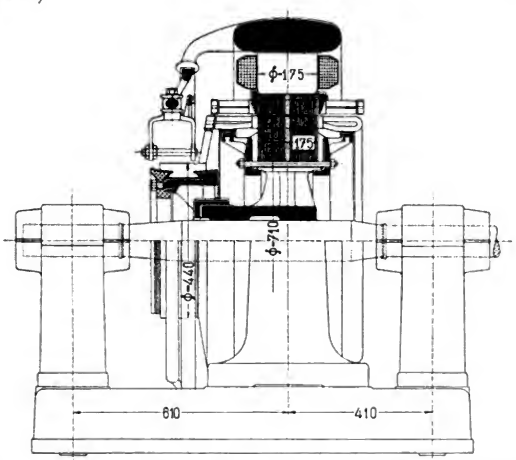


Fig. 293. Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft. Motor, 80 PS, 310—620 Umdr. pro Min. Längsschnitt.

Digitized by Google

Die Maschine ist mit einer Kompensationswicklung ausgerüstet, deren Träger aus einem zwischen den Polen und dem Anker ge-

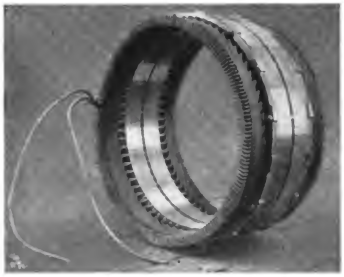


Fig. 294. Blechring mit Kompensationswicklung.

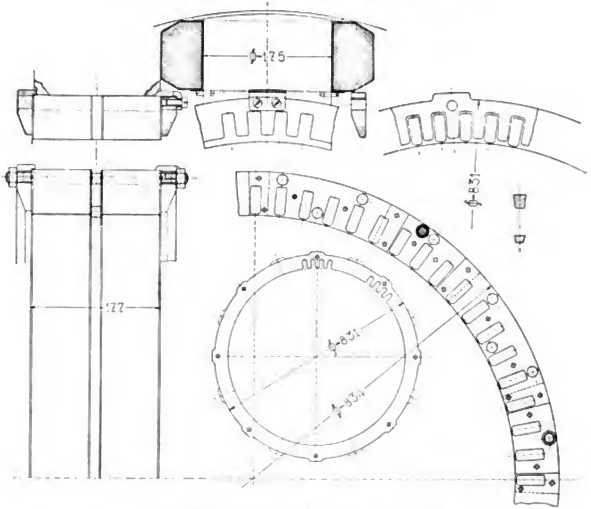


Fig. 295. Details der Kompensationsringe.
Fig. 294 und 295. Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft. Motor, 80 PS, 310—620 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

legenen und aus Segmenten zusammengesetzten Ringe mit Nuten besteht. Die direkt unter den Polen liegenden Segmente sind aus Eisenblech, während die Segmente in der Pollücke aus Zinkblech bestehen. Bei dieser Anordnung ist die Wicklung für sich leicht auf den Blechkörper zu wickeln. Fig. 294 zeigt den fertig gewickelten Blechring und Fig. 295 die Details der Kompensationsringe und ihre Befestigung an die Hauptpole.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:		Bürsten:	
Durchmesser	$D = 71$ cm	Material	Kohle
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 17{,}5$ „	Anzahl der Stifte	8
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 16{,}5$ „	Bürsten pro Stift	2
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 8{,}8$ „	Bürstenabmessungen	2×3 cm
Wicklung:		**Magnetgestell:**	
Reihenwicklung	$a = 1$	Polzahl	$2p = 8$
Leiterzahl	$N = 358$	Polbogen	$b_i = 20{,}7$ cm
Leiterabmessungen	3×15 mm	Polschuhlänge	$l_p = 17{,}5$ „
Nutenzahl	$Z = 179$	Kernquerschnitt	$Q_m = 226$ cm^2
Nutenabmessungen	$5{,}5 \times 37$ mm	Jochquerschnitt	$Q_j = 270$ „
Kommutator:		**Nebenschlußwicklung:**	
Durchmesser	$D_k = 44$ cm	Schaltung der Spulen:	in Serie
Nutzbare Länge	$L_k = 9$ „	Windungen pro Spule	$= 1250$
Lamellenzahl	$K = 179$	Drahtdurchmesser	$\phi = 1{,}8/2{,}0$ mm

Kompensationswicklung.

Innerer Durchmesser des Ringes	71,4 cm	Luftraum einseitig	0,2 cm
		Reihenwicklung	
Äußerer Durchmesser des Ringes	83,4 „	Leiterzahl	408
		Leiterabmessungen	3×16 mm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	17,5 „	Nutenzahl	68
		Nutenabmessungen	14×39 mm
Eisenlänge ohne Luftschlitze	16,5 „		

Fig. 296 zeigt eine Maschine derselben Firma mit Kompensationswicklung und Wendepolen. Die Maschine ist für veränderliche Spannung. Sie leistet 60 KW bei 650 Umdr. pro Min., und zwar 400 Amp. bei 50 Volt, 400 Amp. bei 150 Volt und 200 Amp. bei 300 Volt. Die Wendepole sind besonders erregt; die Kompensationswicklung dient somit nur zur Kompensierung des Ankerfeldes, während die Wendepolwicklung das erforderliche kommutierende

Digitized by Google

Fig. 296. Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft. Generator mit Kompensationswicklung und Wendepolen, 60 KW, 650 Umdr. pro Min.

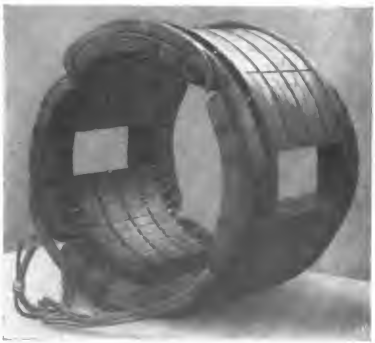


Fig. 297. Kompensationswicklung des Generators auf Fig. 296.

Feld liefert. In Fig. 297 ist der Körper, welcher die Kompensationswicklung enthält, besonders dargestellt. Wie ersichtlich, sind

Digitized by Google

die Blechkörper, welche die Wicklung tragen und zu gleicher Zeit die Polschuhe der Hauptmagnete bilden, durch starke seitliche Blechringe miteinander verbunden.

23. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Turbogenerator, 250 KW, 3000 Umdr. pro Min. 450—650 Volt, 555—384 Amp. (Tafel VII.)

Zwei dieser Maschinen in Tandemanordnung sind direkt gekuppelt mit einer Dampfturbine, System Brown, Boveri-Parsons. Die Maschinen sind mit Kompensationswicklung und Wendepolen versehen. Das Ankereisen ist in sechs Pakete unterteilt, von denen jedes noch mit zwei Preßspaneinlagen von 0,5 mm Stärke versehen ist. Durch eine Reihe axialer Löcher gelangt die von den Rippen der seitlichen Preßkörper angesaugte Luft zu den radialen Luftschlitzen.

Fig. 298. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Bürstenbrille eines Turbogenerators.

Die Wicklung ist als Parallelwicklung ausgeführt und liegt in mit Holzkeilen verschlossenen Nuten. Die Stirnverbindungen werden durch übergeschobene Kappen aus Deltametall gegen die Wirkung der Fliehkraft geschützt. Die Kappe auf der Kommutatorseite ist durch eine Anzahl Bolzen mit dem Preßkörper verschraubt, während diejenige auf der hinteren Seite des Ankers außerdem noch mit einer Nabe auf die Welle aufgekeilt ist.

Die Kommutatorsegmente werden durch drei nahtlos geschmiedete und warm aufgezogene Stahlringe zusammengehalten. Die äußeren Ringe haben Ausdrehungen zum Einbringen von Gewichten beim Ausbalancieren. Die Isolation zwischen Schrumpfring und Kommutator, sowie zwischen den einzelnen Lamellen besteht aus Mikaplatten. Die Fahnen am Kommutator werden aus federhartem Bronzeblech gebogen und sind mit den Lamellen vernietet und mit

Digitized by Google

Silber verlötet. Die Verbindung zwischen den Ankerstäben und Fahnen erfolgt durch beiderseits verlötetes Kabel. Eine Marke an den Lamellen gibt an, wie weit der Kommutator abgedreht werden darf. Die Befestigung auf der Welle erfolgt durch konische Bronzeringe und einen konischen geschlitzten Stahlring. Der Bürstenstiftträger ist am Lager angebracht und mittelst Spindel und Mutter drehbar. Auf der Ankerseite werden die Bürstenstifte durch einen Distanzring gehalten, der mit dem Bürstenstiftträger noch durch zwei Eisenstifte verbunden ist. Fig. 298 zeigt die Bürstenbrille eines ähnlichen Generators.

Das lamellierte Feldeisen hat vier Luftschlitze. Die seitlichen Preßplatten sind entsprechend den Nuten des Feldes ausgefräst und durch eine Anzahl Keile, die in Gußansätzen des Gehäuses liegen, festgehalten.

Die Nebenschlußwicklung liegt in vier breiten Nuten und ist in sechs Pakete unterteilt. Die Kompensationswicklung aus Flachkupfer liegt teils in den breiten Nuten und teils in einer Anzahl gleichmäßig in dem Hauptpol verteilter schmaler Nuten. Die Verbindungen sind ebenfalls aus Flachkupfer und mit den Kompensationsstäben verlötet und vernietet. Sie werden durch Fiberstücke distanziert.

Die Wendepole dieser Maschine (in der Tafel mit *WP* bezeichnet) sind mit dem Magnetsystem aus einem Stück gestanzt. Zur besseren Ausprobierung der richtigen Form des Wendepoles setzt die Firma gegenwärtig ein besonderes Blechpaket für den Wendepol schwalbenschwanzförmig in das Joch ein. Der untere dem Anker zugekehrte Teil des Wendepoles besteht bei dieser Ausführung aus Schmiedeeisen und wird an das Blechpaket angeschraubt.

Das gußeiserne Gehäuse hat nur oben eine Öffnung, durch welche die erwärmte Luft entweicht. Die Luft wird auf der dem Kommutator entgegengesetzten Seite durch einen Kanal von unten durch die Rippen des Preßkörpers und der Schutzkappe angesaugt und durch die axialen und radialen Kanäle des Anker- und des Feldeisens gedrückt. Gegen den Kommutator hin ist das Gehäuse dicht abgeschlossen.

Hauptdaten der Maschine. (Siehe Tabelle Abschnitt 78 Nr. V.)

Anker:

Durchmesser	$D = 48$ cm	Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 7{,}8$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 52$ „	Umfangsgeschwindigkeit	$v = 75$ m/sec
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 46$ „	Luftraum einseitig	$\delta = 1$ cm

Digitized by Google

Wicklung:

Parallelwicklung $a = 1$
Leiterzahl $N = 144$
Leiterabmessungen $2\,(3{,}5 \times 10)$ mm
Nutenzahl $Z = 72$
Nutenabmessungen $11{,}5 \times 37$ mm

Kommutator:

Durchmesser $D_k = 26$ cm
Nutzbare Länge $L_k = 42$ „
Lamellenzahl $K = 72$
Umfangsgeschwindigkeit $v_k = 40{,}8$ m/sec

Bürsten:

Material Metall-Kohle (Endruweit)
Anzahl der Stifte 2
Bürsten pro Stift 5
Bürstenabmessungen $0{,}8 \times 4$ cm
Anzahl der vorgeschobenen Bürsten pro Stift 1
Abmessung dieser Bürsten $1{,}1 \times 4$ cm

Magnetfeld:

Polzahl $2p = 2$
Polbogen $b_i = 49{,}5$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen 50 „
Eisenlänge ohne Luftschlitze 45,2 „
Mittlerer Kernquerschnitt 1500 cm²
Jochquerschnitt 375 cm²

Nebenschlußwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 216
Drahtdurchmesser $\phi = 3{,}3/3{,}8$ mm.

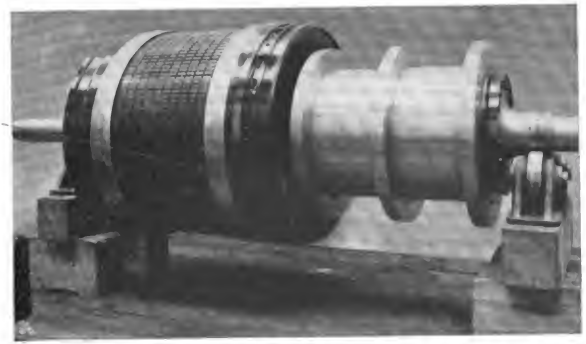


Fig. 299. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Anker eines 1500 KW-Turbogenerators.

Wendepole und Kompensationswicklung.

Polbogen $b_w = 11$ cm
Mittlerer Kernquerschnitt $Q_{wm} = 374$ cm²
Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 22
Leiterabmessungen $5{,}5 \times 35$ mm
Abmessungen des Verbindungskupfers $2\,(2{,}5 \times 40)$ mm

Digitized by Google

Fig. 300. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Turbogenerator für Schiffsbeleuchtung.

Digitized by Google

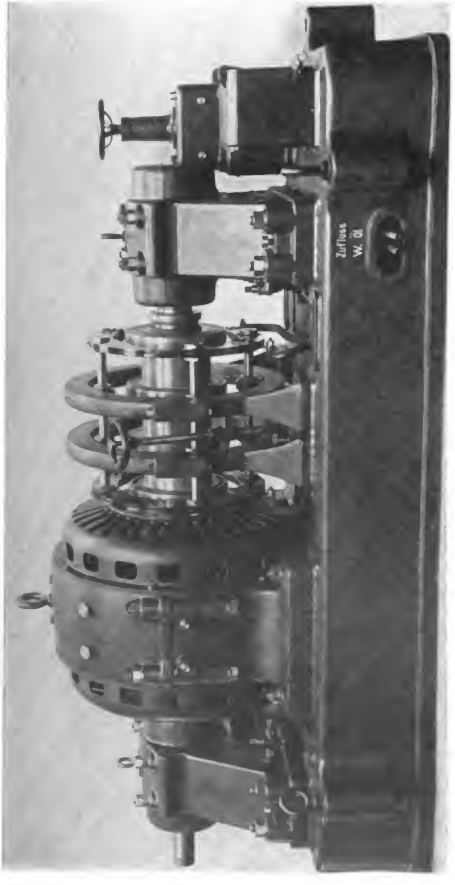


Fig. 301. Siemens-Schuckertwerke. Turbomotor, 200 PS, 4000 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Gewichte:		
	Magnetgehäuse mit Verschalungen	1200 kg
	Feldeisen	1005 „
	Feldkupfer	405 „
	Armatureisen	360 „
	Bronze	240 „
	Armaturkupfer	140 „
	Kommutatorkupfer	150 „
	Schrumpfringe	100 „
	Welle	320 „
	Bürstenbrücke und Diverses	250 „
	Totalgewicht der Maschine	4170 kg

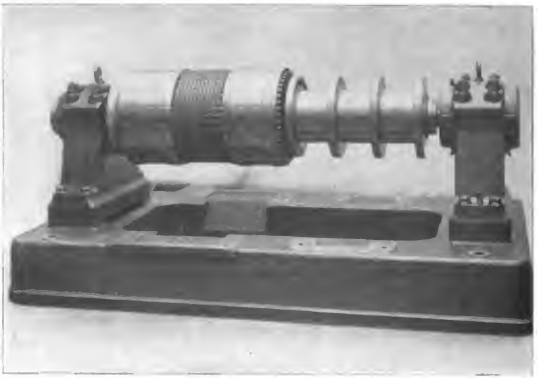


Fig. 302. Siemens-Schuckertwerke. Anker eines Turbogenerators für 170 KW, 3000 Umdr. pro Min.

Fig. 299 zeigt den Anker des 1500 KW-Turbogenerators (1000 Umdr. pro Min., 600 Volt) für das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk in Essen a. d. Ruhr. Man bemerkt daran die starke Unterteilung des Blechkörpers zum Zwecke der Lüftung und die Anordnung der Wicklungskappen. Am äußeren Umfange der Wicklungskappen der Kommutatorseite sieht man die Muttern der Schrauben, welche die Kappen mit dem inneren Preßkörper verbinden.

Fig. 300 zeigt einen Turbogenerator (100 PS) derselben Firma für Schiffsbeleuchtung. Der Bewegungsmechanismus der Bürstenbrille ist hier innerhalb der Verschalung angebracht, es sind davon nur zwei Handräder sichtbar.

Digitized by Google

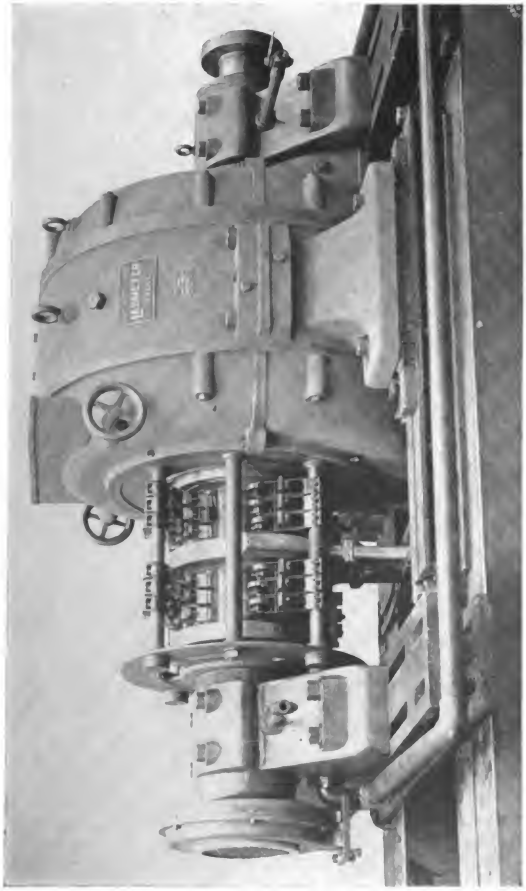


Fig. 303. Felten & Guilleaume Lahmeyerwerke. Turbogenerator, 400 KW, 3000 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

24. **Siemens-Schuckertwerke, G. m. b. H.** Fig. 301 zeigt einen vierpoligen Turbomotor für 200 PS, 4000 Umdr. pro Min. und 220 Volt. Durch die Anordnung zweier Ständer für die Bürstenträger sind alle Bürsten gut zugänglich.

In Fig. 302 ist der Anker eines Turbogenerators 170 KW, 3000 Umdr. pro Min., 220 Volt abgebildet.

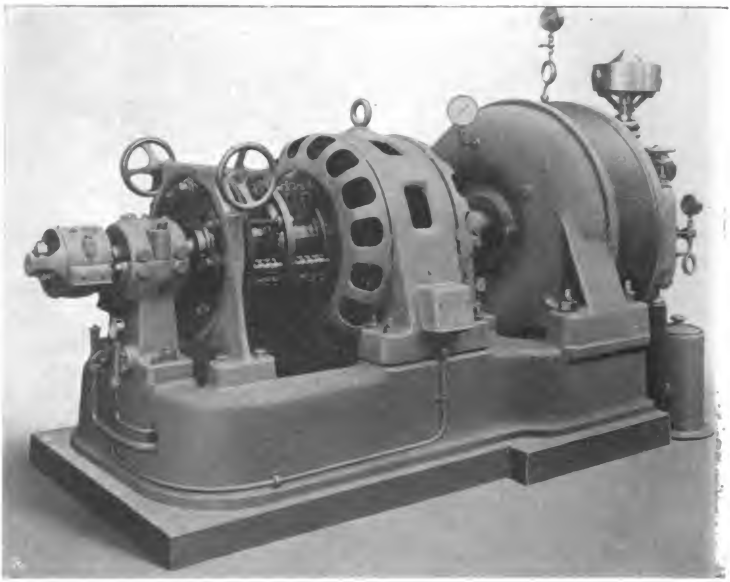


Fig. 304. Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft. Turbogenerator, 200 KW, 2800 Umdr. pro Min.

25. **Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke.** Fig. 303 zeigt einen Turbogenerator für 400 KW, 550 Volt bei 3000 Umdr. pro Min. Die Maschine ist vierpolig und mit Wendepolen ausgerüstet. Sie ist in einem ganz geschlossenen Gehäuse eingebaut. Ein auf das Wellenende aufgesetzter Ventilator besorgt die Kühlung der Maschine und des Kommutators. Die Zufuhr der Luft in das Gehäuse befindet

Digitized by Google

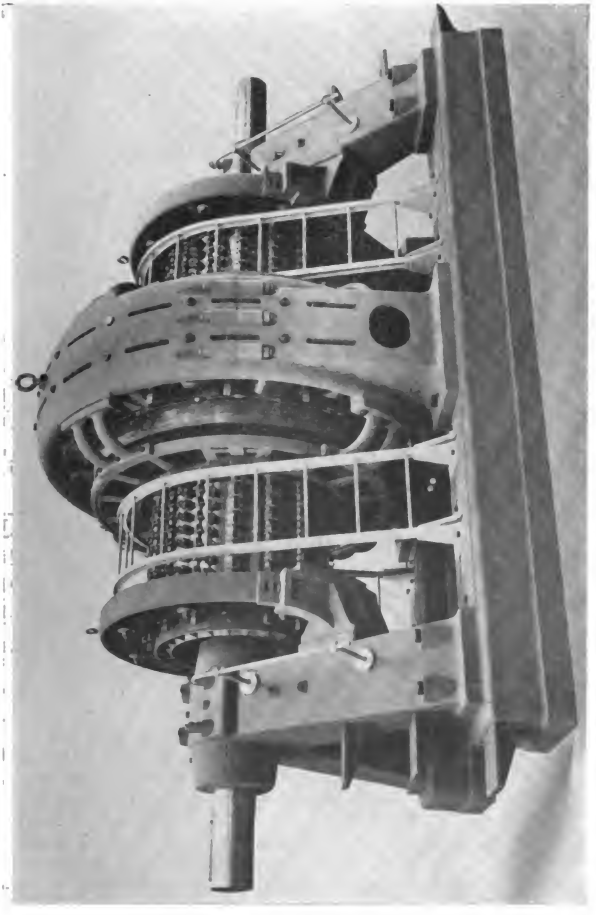


Fig. 305. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator, 1720 KW, 355 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

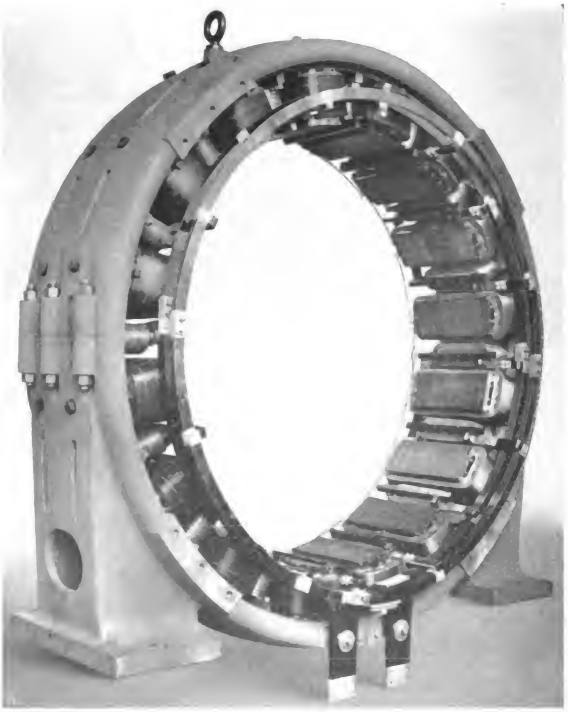


Fig. 306. Magnetgestell des Generators in Fig. 305.

sich unten an der hinteren Verschalung. Die Luft entweicht aus dem Gehäuse durch eine kleine kaminartige Öffnung auf der vorderen Verschalung. Um den unteren Teil des mittleren Kommutatorschrumpfringes befindet sich ein kanalförmiges Gußstück, welches mit auf den Kommutator gerichteten Schlitzen versehen ist. Die Kühlluft wird von unten in den kanalförmigen Körper eingeleitet. Auf jedem Stift ist je eine der Kupferbürsten mit einer vorgeschobenen Kohlenbürste versehen.

Digitized by Google

26. **Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft.** Fig. 304 stellt einen Turbogenerator für 200 KW, 2800 Umdr. pro Min. und 230 Volt dar. Die Maschine ist mit Kompensationswicklung versehen und besitzt eine besondere Erregermaschine. Die Maschine ist ganz offen gebaut.

27. **Maschinenfabrik Oerlikon.** Fig. 305 gibt uns das Bild eines 1720 KW-Generators, 355 Umdr. pro Min., 230 Volt, 7500 Amp. Die Maschine ist 16polig und mit zwei Kommutatoren ausgerüstet. Wir haben somit rund 470 Amp. pro Bürstenstift. Die Bürstenstifte werden auf beiden Seiten durch eine Brille gefaßt. Die eine Brille wird vom Lager aus, die andere vom Joch aus getragen. Zur Kühlung des Kommutators ist neben demselben auf der Welle ein Ventilator angeordnet. Zur besseren Ventilation der Magnetspulen sind im Joch Schlitze angebracht. Die Konstruktion des Magnetgestelles ist aus Fig. 306 ersichtlich. Der Strom wird den Wendepolwicklungen mittelst zweier Sammelschienen zugeführt. Von einer der Sammelschienen ausgehend, durchläuft der Strom die Wicklung eines Wendepols und geht dann durch eine Verbindung auf der hinteren Seite zur Wicklung des benachbarten Wendepols. Das Ende der Wicklung dieses Pols liegt vorn und ist an die andere Schiene angeschlossen. Die Wendepolspulen liegen somit paarweise parallel an den Sammelschienen. Der Strom wird den Schienen unten zugeführt. Der untere Teil der Schienen führt somit den Strom für sämtliche Wendepolspulen, während der obere Teil der Schienen nur den Strom für einige Wendepole führt. Es sind deshalb die Sammelschienen unten aus mehreren parallelen Flachkupferbändern zusammengesetzt, während oben nur ein einziges Flachkupferband vorhanden ist.

Digitized by Google

Elftes Kapitel.

40. Allgemeines über die Vorausberechnung. — 41. Grundlagen der Vorausberechnung. — 42. Wahl der Hilfsmittel für die Kommutierung (Wendepole und Kompensationswicklung). — 43. Wahl der Ankerkonstruktion. — 44. Wahl der Ankerwicklung. — 45. Umfangsgeschwindigkeit und Tourenzahl. — 46. Wahl des Verhältnisses von Ankerlänge zu Polbogen. — 47. Wahl der Polzahl. — 48. Ableitung der Formeln zur Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine. — 49. Größe der linearen Belastung AS und ihr Einfluß auf die Gewichte, die Verluste, den Wirkungsgrad und die Kommutierung.

40. Allgemeines über die Vorausberechnung.

Die Vorausberechnung einer elektrischen Maschine macht eine große Zahl von Überlegungen notwendig. Der Berechnende steht vielen unbekannten Größen, die er festlegen soll, gegenüber, und die möglichen Lösungen sind sehr zahlreich. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als unter der Annahme von gewissen Größen mit der Berechnung der Reihe der Unbekannten an einem Ende zu beginnen und unter beständiger Kontrolle und Vornahme der sich als notwendig ergebenden Korrekturen schrittweise der endgültigen Lösung zuzustreben. Dem Konstrukteur wird dabei nicht nur die Aufgabe gestellt, eine gute Maschine zu entwerfen, sondern er soll auch mit dem geringsten Gewicht des Materials, bezw. den geringsten Kosten allen gestellten Bedingungen genügen. — Es ist in den meisten Fällen nicht schwierig, eine gut arbeitende Maschine zu bauen, wenn auf die Wirtschaftlichkeit keine Rücksicht genommen wird. Erst das Bestreben, eine möglichst billige und doch gute Maschine zu bauen, führt den Konstrukteur an die Grenzen der zulässigen Beanspruchungen und macht genaue Berechnungen und sorgfältige Überlegungen erforderlich.

Wer in der Berechnung und im Bau von Dynamomaschinen Erfahrung besitzt und sich ein gewisses Geschick in der Wahl und der Ermittlung der verschiedenen Größen angeeignet hat, wird besser und schneller zum Ziele kommen als der Anfänger. Im nachfolgenden wird die Berechnung ausführlich erörtert und mög-

Digitized by Google

lichst genau durchgeführt, sie nimmt dadurch mehr Zeit in Anspruch, als es in vielen Fällen notwendig ist. Der erfahrene Rechner wird jedoch die Kürzungen je nach dem Grade der gewünschten Genauigkeit leicht vornehmen können, und dem gewissenhaften Anfänger kann nur eine genaue Berechnung die erwünschte Sicherheit bringen.

41. Grundlagen der Vorausberechnung.

Um eine Maschine berechnen zu können, ist es notwendig zu wissen, welchen Bedingungen die Maschine im Betriebe genügen soll und welche Anforderungen außerdem an sie gestellt werden. Die Grundlagen für die Vorausberechnung bestehen demnach in den Angaben über:

Umdrehungszahl,
Spannung,
Stromstärke,
Art der Erregung,
Zulässige Änderung der Spannung oder der Stromstärke,
Geforderte Regulierung der Spannung, der Stromstärke oder der Umdrehungszahl,
Zeitliche, durch den Betrieb bedingte Änderung der Belastung,
Zulässige Erwärmung,
Wirkungsgrad,
Bauart (offen oder geschlossen).

Seitdem durch die Anwendung von Wendepolen und der Kompensationswicklung es möglich ist, unter schwierigen Betriebsverhältnissen eine gute Kommutation zu erreichen, ist die Anwendung der Gleichstrommaschine bedeutend erweitert und viel mannigfaltiger geworden. Wenn wir die Arbeitsweise der Maschine in Betracht ziehen, können wir folgende Einteilung vornehmen:

A. Generatoren.

1. Generatoren für konstante (oder annähernd konstante) Klemmenspannung.

a) mit konstanter Tourenzahl. Diese werden meistens für Licht- und Kraftzwecke mit an das Netz parallel angeschlossenen Stromverbrauchern gebraucht.

Sie haben gewöhnlich Nebenschluß- oder Doppelschlußerregung, seltener Fremderregung. Um die Spannung konstant zu halten, d. h. um den Spannungsabfall in der Maschine auszugleichen, muß

Digitized by Google

die Nebenschluß- und Fremderregung mittelst eines vorgeschalteten Widerstandes regulierbar sein.

b) mit konstantem äußerem Widerstande und veränderlicher Tourenzahl. Diese werden meistens für Zugbeleuchtung verwendet. Sie zeigen allgemein eine besondere Bau- oder Wicklungsart (siehe Kap. 23).

2. Generatoren für konstante Stromstärke.

a) mit konstanter Tourenzahl. Diese fanden früher Anwendung bei dem Serie-Kraftübertragung-System Thury (s. Abschn. 106) und werden in neuerer Zeit für elektrische Schweißung benützt. Die Feldwicklung liegt im Nebenschluß oder im Hauptschluß. Um den Strom konstant zu halten, wird die Felderregung selbsttätig geändert oder die Bürstenbrille verstellt oder es erhält die Maschine eine besondere Bau- oder Wicklungsart.

b) mit konstanter Felderregung und veränderlicher Tourenzahl. Diese werden hauptsächlich bei dem Serie-Kraftübertragung-System Thury (s. Abschn. 106) gebraucht. Die Feldwicklung liegt im Hauptschluß. Um den Strom konstant zu halten wird die Tourenzahl so geändert, daß das Drehmoment konstant bleibt.

3. Generatoren für veränderliche Spannung und Stromstärke.

Hierher gehören

a) Nebenschluß-Generatoren zum Laden von Akkumulatoren;

b) Doppelschluß-Generatoren, deren Spannung mit der Belastung steigt (überkompoundierte Generatoren);

c) Zusatzmaschinen zum Laden von Akkumulatoren mit konstanter oder veränderlicher Umdrehungszahl;

d) Anlaß-Generatoren zum Anlassen und Tourenregeln größerer Motoren;

e) Hauptschluß-Generatoren mit konstanter Umdrehungszahl für Zwei- und Dreileiter-Arbeitsübertragungen (s. Abschn. 111).

B. Motoren.

1. Motoren für konstante Klemmenspannung mit Nebenschlußerregung:

a) mit konstantem Nebenschlußwiderstand und annähernd konstanter Umdrehungszahl bei verschiedenen Belastungen;

b) mit veränderlichem Nebenschlußwiderstand bezw. mit unabhängig von der Belastung veränderlicher Umdrehungszahl.

2. Motoren für konstante Klemmenspannung mit Hauptschlußerregung.

Digitized by Google

Die Umdrehungszahl ändert sich mit der Belastung (Straßenbahnmotoren).

3. Motoren für konstante Klemmenspannung mit Doppelschluß-Erregung.

Die Umdrehungszahl ist veränderlich mit der Belastung, jedoch innerhalb engerer Grenzen als im Falle 2.

4. Motoren für konstante Stromstärke mit Hauptschlußerregung.

Um die Umdrehungszahl zu regulieren bezw. konstant zu halten, wird ein zur Hauptschlußwicklung parallel liegender Widerstand verändert oder die Bürsten werden in Abhängigkeit von der Belastung verstellt. Die Motoren kommen bei den Kraftübertragungen System Thury (s. Abschn. 106) zur Anwendung.

5. Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke:

a) mit Nebenschluß- oder Fremderregung.

Hierher gehören die Motoren, die mit Hilfe eines Anlaßgenerators in Betrieb gesetzt und reguliert werden.

b) Mit Hauptschlußerregung.

Diese kommen bei Zwei- und Dreileiter-Arbeitsübertragungen zur Anwendung (siehe Abschn. 111).

Auf die Arbeitsweise der obengenannten verschiedenen Klassen von Maschinen wird später näher eingegangen. Wir denken uns, die erforderlichen Angaben seien für die Vorausberechnung gegeben.

Die Erregung und die Eisenquerschnitte der Maschine sind für den größten erforderlichen Kraftfluß zu berechnen, also z. B. bei konstanter Klemmenspannung für die kleinste Umdrehungszahl.

Die Kommutierung ist für die ungünstigsten Betriebsverhältnisse zu prüfen, also für die größte Ankerbelastung und die kleinste Felderregung, z. B. bei einem Nebenschlußmotor mit veränderlicher Umdrehungszahl für die höchste Umdrehungszahl und die größte Stromstärke. Die Rechnung zeigt dann, ob ohne besondere Hilfsmittel noch eine gute Kommutation zu erreichen ist.

Auf die Höhe und die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Belastung sind die Betriebsverhältnisse ebenfalls von Einfluß. Maschinen, die einen großen oder den größten Teil der Zeit mit kleiner Belastung arbeiten, sollen hierbei einen möglichst hohen Wirkungsgrad haben, während man bei Maschinen, die fast immer vollbelastet laufen, auf einen hohen Wirkungsgrad bei Vollast besonders zu achten hat.

Digitized by Google

Auf die Abmessungen und die Bauart der Maschine hat ferner die Erwärmung großen Einfluß. Bei geschlossener Bauart oder bei sehr rasch laufenden Maschinen kann in vielen Fällen die zulässige Erwärmung nur durch Anwendung von Ventilatoren und eine gute Verteilung der Kühlluft in der Maschine oder durch Wasserkühlung eingehalten werden.

42. Wahl der Hilfsmittel für die Kommutierung (Wendepole und Kompensationswicklung).

Die Hilfsmittel, die uns zur Erreichung einer guten Kommutation zur Verfügung stehen, sind in Bd. I, Kapitel 24 und 25 ausführlich erörtert worden. Wenn die Grenzwerte von Δe und e_s (Seite 291) überschritten werden müssen, sind Wendepole anzuordnen und es ist, wenn erforderlich, außerdem eine Kompensationswicklung anzubringen. Bei kleinen Maschinen (bis 30 und 50 KW Leistung) sind im allgemeinen etwas höhere Werte von Δe und e_s zulässig als bei großen Maschinen, so daß man bei letzteren eher zu Wendepolen übergehen muß als bei kleinen Maschinen.

Mit großen Zahnsättigungen, großem Luftspalt, gesättigten Polspitzen, geschlitztem Polkern usf. läßt sich außerdem bei kleinen Maschinen ohne erhebliche Erhöhung der Kosten viel erreichen und sehr hohe Werte von AS sind wegen Mangel an Raum und unzureichender Lüftung bei kleinen Maschinen nicht möglich.

Bei großen Maschinen erhöhen die Wendepole die Herstellungskosten um 7 bis 10 %, die normale Leistung der Maschine dagegen bis um 30 und 40 % und die kurzzeitige Überlastungsfähigkeit um noch mehr; es gilt das für Maschinentypen, die ohne Wendepole sparsam und sorgfältig gebaut sind. Da große, nicht zu langsam laufende Maschinen leicht mit einer guten Lüftung versehen werden können, wird die Wendepolmaschine die gewöhnliche Maschine für große Leistungen in kurzer Zeit nahezu ganz verdrängen, insbesondere für Betriebe mit kurzzeitigen starken Überlastungen.

Die Vorteile, welche mit der Anwendung von Wendepolen verbunden sind, und die Wirkungen, die sie auf den Bau der Maschine ausüben, ergeben sich aus folgender Zusammenstellung.[1])

1. Die lineare Belastung AS des Ankers kann größer gewählt werden, und es sind tiefe und schmale Ankernuten zulässig.

[1]) Siehe auch G. Dettmar, ETZ 1906, S. 23; W. Oeschläger, ETZ 1906, S. 209 u. 783; M. Déri, ETZ 1906, S. 210; R. Pohl, ETZ 1906, S. 375.

Digitized by Google

2. Die Zahl der Windungen einer Spule kann größer bezw. die Zahl der Kommutator-Lamellen kleiner sein, was namentlich bei höheren Spannungen in Betracht kommt. Der Kommutator wird infolgedessen billiger nnd erhält eine höhere Festigkeit.

3. Die Stromstärke eines Ankerzweiges und die Stromstärke eines Bürstensatzes kann größer gewählt werden.

4. Man ist in der Wahl der Polzahl freier. Es kann ohne Rücksicht auf die Zunahme der Quermagnetisierung (vergl. jedoch Ziffer 20) eine kleinere Polzahl bezw. eine größere Polteilung, als auch, um eine leichtere Maschine zu erhalten, eine größere Polzahl gewählt werden.

5. Eine übermäßig hohe Zahnsättigung und ein großer Luftspalt, die mit Rücksicht auf eine gute Kommutation bei gewöhnlichen Maschinen oft angewandt werden, sind entbehrlich. Dadurch wird an Feldkupfer gespart und die Erwärmung der Feldspulen verkleinert. Die Polschenkel können kürzer und der äußere Durchmesser der Maschine kann ev. kleiner werden.

6. Man ist in der Ankerlänge weniger beschränkt und kann Maschinen verschiedener Leistung mit gleichem Durchmesser und verschiedener Ankerlänge für große Leistungsunterschiede bauen.

7. Die Spannung zwischen benachbarten Lamellen darf größer sein, der Bau von Maschinen für hochgespannten Gleichstrom wird dadurch erleichtert.

8. Wegen der besseren Kommutation bezw. der besseren Stromverteilung unter den Bürsten werden die Übergangsverluste am Kommutator kleiner, die Stromdichte der Bürsten kann daher größer gewählt werden und die Anwendung von Metall-Kohlenbürsten (z. B. Endruweitbürsten) oder Kohlenbürsten mit Metallbeimischung wird zulässig. Der Kommutator wird dadurch kürzer und billiger und die Reibungsverluste der Bürsten kleiner.

9. Die Bürsten stehen in der geometrisch neutralen Zone.

10. Die zulässige Überlastungsfähigkeit ist eine bedeutend größere, sie kann für kurze Zeit 50% bis 100% erreichen, während sie bei normalen gewöhnlichen Maschinen bei funkenfreiem Gang nur etwa 25% bis 50% erreicht.

11. Die größere kurzzeitige Überlastungsfähigkeit kommt den Bahnmotoren besonders zugute, wenn eine große Anfahrbeschleunigung gefordert ist, oder große Steigungen von kurzer Länge zu überwinden sind, denn bei gegebenem Motorgewicht ist eine höhere Leistung erreichbar. Ferner kann man für Hauptbahnen mit großen Entfernungen Motoren mit höheren Spannungen (2000 bis 3000 Volt) bauen. Bei dem Vorhandensein von Wende-

Digitized by Google

polen darf die Feldwicklung unterteilt und zur Geschwindigkeitsregulierung verschieden geschaltet werden.[1])

12. Sowohl bei Nebenschluß- als Hauptschlußmotoren ist eine Regulierung der Umdrehungszahl durch Änderung der Felderregung innerhalb weiter Grenzen möglich. Räderübersetzungen und Vorgelege können dadurch umgangen werden (Antrieb von Werkzeugmaschinen).

13. Vorhandene Maschinenmodelle erhalten wegen der freieren Wahl der Polzahl und der Feldstärke eine größere Anpassungsfähigkeit. Soll z. B. ein Generator, der direkt mit einer Dampfmaschine gekuppelt ist, für Lichtbetrieb mit 440 Volt und für Bahnbetrieb mit 550 Volt betrieben und die Dampfmaschine in beiden Fällen voll ausgenutzt werden, so muß man bei geschwächtem Felde (440 Volt) eine erhöhte Stromstärke kommutieren.

14. Der Wirkungsgrad der Maschine wird durch die Anwendung von Wendepolen nicht erheblich beeinflußt. — Auf den Hauptpolen wird (vergl. Ziffer 5) an Stromwärmeverlust gespart, wogegen die Erregung der Wendepole neue Verluste bringt. Die Eisenverluste werden wenig verändert und die Verluste am Kommutator sind kleiner. Bei mäßiger Sättigung des Eisens und starker Belastung des Ankers wird bei kleinen Belastungen ein höherer Wirkungsgrad erreicht.

15. Bei genügender Breite der Wendepole kann ihre kompoundierende Wirkung durch leichtes Verstellen der Bürsten so geändert werden, daß bei Generatoren eine Spannungsregulierung in weiten Grenzen und bei Motoren eine Einstellung der gewünschten Umdrehungszahl ohne Feldregulierung möglich ist.

Mit der Anwendung von Wendepolen sind jedoch auch Nachteile verbunden, insbesonders ist zu sagen:

16. die Feldstreuung wird durch die Anwesenheit der Wendepole erhöht;

17. die Lüftung und Kühlung der Feldspulen wird erschwert, ebenso die Kühlung des Ankers;

18. parallelgeschaltete Wendepol-Generatoren sind empfindlich bezüglich der Bürstenstellung, weil eine kleine Bürstenverstellung eine erhebliche Änderung der kompoundierenden Wirkung der Wendepole bezw. der Klemmenspannung zur Folge hat;

19. bei Motoren mit Wendepolen tritt unter Umständen (s. Bd. I, S. 570) ein Pendeln ein. Das Pendeln ist ebenfalls von der Bürstenstellung abhängig;

20. starke und plötzliche Belastungsänderungen können ein

[1]) Siehe ETZ 1906. S. 1098.

Digitized by Google

Rundfeuer am Kommutator veranlassen (siehe Bd. I, S. 571). Wo derartige Belastungsänderungen vorkommen, ist der magnetische Widerstand für das Querfeld möglichst groß zu machen (gesättigte Polspitzen, geschlitzte Polkerne, größerer Luftspalt), und wenn nötig ist die lineare Belastung AS kleiner als sonst zulässig zu wählen. Letzteres ist auch mit Rücksicht auf die vom Querfeld verursachten zusätzlichen Zahnverluste geboten.

Die Kompensationswicklung mit oder ohne Wendepolen nach Ryan oder Déri kommt bei schwierigen Verhältnissen für die Kommutierung und großen plötzlichen, sich periodisch wiederholenden Belastungsänderungen in Frage, wie in Bd. I, Abschnitt 142, S. 571 ausführlich begründet ist.

Aus der obigen Zusammenstellung der Vor- und Nachteile von Wendepolmaschinen und von vollkommen kompensierten Maschinen ist ersichtlich, daß infolge einer guten Kommutierung nicht allein die Leistungsfähigkeit der Maschinen erhöht wird, sondern daß sich auch neue und schwierige Aufgaben lösen lassen, die der Gleichstrommaschine ein weites Feld der Anwendung eröffnen.

Für diese Bauart, die einen neuen Abschnitt in der Entwicklung und Anwendung der Gleichstrommaschine bedeutet, kommen insbesonders in Betracht: Maschinen mit hohen Umdrehungszahlen (Turbogeneratoren, Antriebsmotoren für Zentrifugen, Ventilatoren, Kreiselpumpen), Anlaßgeneratoren, Zusatzmaschinen, Motoren mit innerhalb weiter Grenzen veränderlicher Umdrehungszahl, Motoren und Generatoren für große und kurzzeitige Überlastungen oder großen und periodisch sich wiederholenden Belastungsänderungen, sowie Generatoren für große Stromstärken (Elektrolytmaschinen). Aber auch für normale Maschinen größerer Leistung, die bisher ohne Wendepole sich tadellos ausführen ließen, bringt der Wendepol durch die Erhöhung der Leistungsfähigkeit große Vorteile. Bei kleineren Motoren für höhere Spannungen, etwa von 450 Volt an aufwärts, welche hinsichtlich der Kommutation Schwierigkeiten bieten, können Wendepole ebenfalls mit Vorteil angewandt werden.

Die sorgfältige Durchbildung der Lüftung, die Anwendung von Ventilatoren oder Wasserkühlung gewinnt jetzt erhöhte Bedeutung, weil die Leistungsgrenze nicht durch die Funkenbildung, sondern durch die Erwärmung bestimmt wird.

43. Wahl der Ankerkonstruktion.

Die Scheibenanker und die Flachringanker sind als veraltete Konstruktionen zu betrachten, wir werden somit in allen Fällen die Wahl zwischen dem gewöhnlichen Ringanker und dem

Digitized by Google

Trommelanker zu treffen haben. Hierbei kommen folgende Gesichtspunkte in Betracht.

1. Bei der Trommelwicklung ist die größte Spannung zwischen den übereinander oder nebeneinander liegenden Spulenseiten annähernd gleich der vollen Klemmenspannung, bei der Gramme'schen Ringwicklung dagegen nur gleich der in einer einzelnen Spule induzierten EMK. Ferner kann bei einer Ringwicklung jede einzelne Spule, ohne die übrigen zu beschädigen, leicht ersetzt werden. Die Ringwicklung eignet sich daher bei kleinen Stromstärken besser für hohe Spannungen als die Trommelwicklung.

2. Die Ringwicklungen haben dagegen den Nachteil, daß bei kleinen und namentlich bei zweipoligen Maschinen der Armaturquerschnitt $D \times l$ nur schlecht ausgenützt werden kann, daß die Selbstinduktion der Armaturspulen und die Drahtlänge derselben größer wird als bei Trommelankern und daß der ganze Armaturstern oder ein Teil von ihm aus Bronze hergestellt werden muß.

Bei Trommelankern mit Wellenwicklung wird der Wicklungsschritt räumlich nur halb so groß als bei Ringankern mit Wellenwicklung, die Querverbindungen werden kürzer, und die ganze Wicklung ist daher bei der Trommel viel einfacher. Ferner ist das Zusammensetzen der Wicklung aus Formspulen, ein Verfahren, das insbesondere bei Massenfabrikation große Vorteile bietet, nur bei Trommelwicklung möglich. Überhaupt ermöglicht die Trommelwicklung eine bessere mechanische Konstruktion, sowie eine bessere Kühlung und Ventilation des Ankers. Man wird daher in allen Fällen, wo nicht besondere Gründe dagegen sprechen, die Trommelwicklung anwenden.

44. Wahl der Ankerwicklung.

Wir müssen unterscheiden:

1. die Parallelwicklung (Schleifenwicklung) mit $i_a = \frac{J_a}{2p}$

2. die mehrfache Parallelwicklung (Schleifenwicklung) mit $i_a = \frac{J_a}{2mp}$

3. die Reihenwicklung (Wellenwicklung) mit $i_a = \frac{J_a}{2}$

4. die Reihenparallelwicklung des Verfassers (Wellenwicklung) mit $i_a = \frac{J_a}{2a}$.

Der Ankerzweigstrom i_a ist so zu wählen, daß man für den Leiter einen passenden Querschnitt erhält. Er soll im allgemeinen

Digitized by Google

die Grenze 200 bis 250 Amp. nicht überschreiten, und man bleibt bei Nutenankern und Spannungen über 120 Volt besser unter oder in der Nähe von 150 bis 200 Amp.

Bei Maschinen mit künstlicher Kommutation (d. h. mit Wendepolen oder Kompensationswicklung) und zwei Stäben übereinander in einer Nut kann man mit i_a wesentlich höher gehen. Es sind Maschinen auf diese Art mit i_a bis zu etwa 550 Amp. ausgeführt.

Was die Wahl zwischen Schleifen- und Wellenwicklung betrifft, so ist folgendes zu bemerken.

Bei der Schleifenwicklung liegen die Spulen eines Ankerzweiges innerhalb einer doppelten Polteilung. Infolge von magnetischen Unsymmetrien des Feldes treten daher kleine Potentialdifferenzen zwischen den gleichnamigen Bürsten und daher ungleiche Stromstärken in den einzelnen Ankerzweigen auf. Obwohl die Rückwirkung dieser Ströme die Unsymmetrien schwächt, so reicht doch im allgemeinen diese Schwächung nicht aus, um innere Ankerströme zu vermeiden. Diese erwärmen den Anker, vergrößern die Verluste und können die Bürsten bis zur Funkenbildung überlasten. In allen Fällen ist auf gleiche Beschaffenheit und Form der Pole und Polschuhe und auf eine genau zentrische Lagerung des Ankers großes Gewicht zu legen. Ein großer Luftspalt und große Zahnsättigung vermindern die magnetischen Unsymmetrien ebenfalls.

Viel besser und hinsichtlich des Kupferverbrauches sparsamer als ein großer Luftspalt sind Äquipotentialverbindungen. Fabriken, die im Baue von großen Generatoren mit Schleifenwicklung reiche Erfahrung besitzen, führen die Schleifenwicklung stets mit Äquipotentialverbindungen aus. Die Ausgleichströme fließen jetzt nicht mehr durch die Bürsten, sondern als Wechselströme durch die Äquipotentialverbindungen, sie können aber, falls die magnetische Unsymmetrie erheblich ist, so groß werden, daß sich die Maschine unzulässig stark erwärmt oder ihr Wirkungsgrad erheblich fällt.

Die mehrfache Parallelwicklung mit $2mp$ Ankerzweigen kommt nur bei Maschinen, deren Stromstärke im Verhältnis zur Polzahl sehr groß ist, in Betracht, also bei kleinen Klemmenspannungen oder bei sehr großen Umfangsgeschwindigkeiten.

Die amerikanische Praxis gibt bis jetzt der Schleifenwicklung den Vorzug und die Maschinen erhalten dadurch oft eine ungewöhnlich niedrige Polzahl oder einen zu kleinen Drahtquerschnitt. Die Bevorzugung der Schleifenwicklung beruht wohl darauf, daß zum Entwurf einer Wellenwicklung eine größere Erfahrung erforderlich ist.

Digitized by Google

Eine richtig entworfene und mit Äquipotentialverbindungen versehene Wellenwicklung ist der Parallelwicklung überlegen.

Der Verfasser hat Maschinen mit Reihenparallelwicklung zuerst in der Maschinenfabrik Oerlikon im Jahre 1891 für vier- und sechspolige Maschinen angewandt, und seither sind insbesondere von den Firmen Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke; Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft; Sachsenwerk, Niedersedlitz; Vereinigte Elektricitäts-Gesellschaft, Wien; Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi; Comp. International d'Electricité, Lüttich; A.-G. Volta, Reval und anderen, viele große vielpolige Maschinen mit Reihenparallelwicklung und Äquipotentialverbindungen mit vorzüglichem Erfolge ausgeführt worden.

Zunächst hat die Erfahrung gezeigt, daß eine Reihenparallelwicklung mit Äquipotentialverbindungen versehen werden muß. Es sind zwar mehrfach Maschinen mit Reihenparallelwicklung ohne diese Verbindungen ausgeführt worden, die ganz gut arbeiten, sie sind jedoch sehr empfindlich hinsichtlich der Einstellung der Bürsten.

Die Vorteile einer Reihenparallelwicklung mit Äquipotentialverbindungen gegenüber einer Parallelwicklung sind folgende:

1. Es kann die Zahl der Ankerzweige unabhängig von der Polzahl als ein beliebiges Vielfaches von 2 gewählt und in allen Fällen ein für die Ausführung und die Bemessung der Maschine günstiger Stabquerschnitt erhalten werden.

2. Führt man die Äquipotentialverbindungen allgemein so aus, daß man von einer Lamelle mit Äquipotentialverbindung ausgehend und der Wicklung folgend z Ankerspulen durchlaufen muß, bis man wieder auf eine Lamelle mit Äquipotentialverbindung stößt, so kann z gleich 2, 3, 4, 5 usf. bis 10 und noch größer sein.

Bei einer Schleifenwicklung bilden die z Ankerspulen aufeinanderfolgende Schleifen innerhalb der Felder von zwei Polen, dagegen bei der Wellenwicklung z aufeinanderfolgende Wellen, die sich auf $2z$ Magnetfelder erstrecken. Bei der Schleifenwicklung werden daher z Spulen, die sich im stärksten Felde befinden, durch die Ausgleichverbindungen gegen z Spulen geschaltet, die sich im schwächsten Felde befinden, und wir erhalten einen großen Ausgleichstrom und einen entsprechend großen Wattverlust.

Bei der Wellenwicklung bewegen sich dagegen die z Spulen in $2z$ Magnetfeldern und wir erhalten bei einem vollkommenen Ausgleich der Potentialdifferenzen von je z gegeneinandergeschalteten

Digitized by Google

Ankerspulen und der günstigen Wirkung auf den Verlauf der Kommutation erheblich kleinere Ausgleichströme.

Macht man $z = p$ oder ein ganzes Vielfaches von p, z. B. $z = q\,p$, so sind die $2z$ Spulenseiten auf alle Pole gleichmäßig verteilt. In diesem Fall ist auf dem $\left(\frac{a}{p}\right)$-ten Teil des Kommutatorumfanges jede a-te bezw. jede $(q\,a)$-te Lamelle an eine Äquipotentialverbindung anzuschließen. (Siehe Bd. I, Seite 200 unten.) Infolge Ungleichheit der Magnetfelder können jetzt innere Ankerströme nicht entstehen, während die günstige Wirkung der Äquipotentialverbindungen auf die Kommutation erhalten bleibt.[1])

Will man jedoch mit Rücksicht auf die Ausbalancierung des Ankers z. B. bei Turbogeneratoren den durch ungleiche Feldstärken hervorgerufenen einseitigen magnetischen Zug beseitigen, so ist $z < p$ zu machen, so daß die verschiedenen Feldstärken durch innere Ankerströme ausgeglichen werden. Auch mit Rücksicht auf die Kommutation ist es bei großen Werten von p und ungünstigen Betriebsverhältnissen geboten, $z < p$ zu machen.

Die hier genannten Vorzüge der Wellenwicklung treten umso mehr hervor, je kleiner der Luftspalt δ im Verhältnis zur Größe des Polbogens und der Ankerbelastung AS gewählt wird, weil die Ungleichheit der Magnetfelder, und zwar des Hauptfeldes und des Querfeldes, mit abnehmendem δ wächst. — Wir können also sagen:

Die Reihenparallelwicklung mit Äquipotentialverbindungen ist gegen Ungleichheiten des Magnetfeldes viel weniger empfindlich als die Schleifenwicklung mit oder ohne Äquipotentialverbindungen. Die Reihenparallelwicklung kommt daher für Wendepolmaschinen, bei denen ein kleiner Luftspalt bei großem Polbogen und großer Ankerbelastung AS möglich ist, besonders in Betracht. —

Um eine vollkommene Symmetrie der Ankerzweige zu erreichen, ist es günstig, alle $2p$ Bürsten aufzulegen und die Zahl der Schließungen der Wicklung möglichst klein zu machen. Um

[1]) Die Äquipotentialverbindungen haben insbesonders auch die Aufgabe, die Pulsationen des Magnetfeldes, welche eine gute Kommutation unmöglich machen können, zu dämpfen. Diese Pulsationen werden durch die veränderlichen Amperewindungen der Kurzschlußzone, die periodischen Änderungen des magnetischen Widerstandes, z. B. infolge der veränderlichen Stellung der Ankerzähne zu den Polen und andere Ursachen hervorgerufen. Der Ausgleich konstanter magnetischer Unsymmetrien ist von untergeordneter Bedeutung. Bei der Schleifenwicklung muß aber dieser Ausgleich, und zwar unter Umständen mit großen Wattverlusten, in Kauf genommen werden, während er sich bei den Wellenwicklungen, unbeschadet einer guten Dämpfung, ganz vermeiden oder stark vermindern läßt.

Digitized by Google

ferner sowohl bei der Schleifenwicklung wie bei der Wellenwicklung mit Äquipotentialverbindungen eine vollkommen symmetrische Wicklung zu erhalten, sollen folgende Bedingungen erfüllt werden:

$$\frac{K}{a} \text{ gleich einer ganzen Zahl.}$$

Bei Wicklungen mit $\frac{p}{a}$ gleich einer ganzen Zahl soll ferner die Bedingung

$$\frac{Z}{a} \text{ gleich einer ganzen Zahl}$$

immer erfüllt werden.

Bei Wicklungen mit $\frac{a}{p}$ gleich einer ganzen Zahl genügt es, wenn $\frac{Z}{p}$ gleich einer ganzen Zahl ist.

Nur Wicklungen mit $\frac{p}{a}$ oder $\frac{a}{p}$ gleich einer ganzen Zahl, bei welchen diese Bedingungen erfüllt sind, werden vollkommen symmetrisch. Bei den übrigen Wicklungen ist auf die Befriedigung der Bedingung $Z:a$ (bezw. $Z:p$, wenn $a>p$) gleich einer ganzen Zahl weniger Wert zu legen.

Bei allen Wicklungen sollen, wenn möglich, nur solche Verhältnisse gewählt werden, für welche es ohne besondere Hilfsmittel (Bd. I, S. 190) möglich ist, $Z:a$ gleich einer ganzen Zahl zu machen (Zahlentafel Bd. I, S. 187).

Sobald bei den Potentialschritten ein Fehler auftritt, ist zu prüfen, ob dieser nicht die zulässige Grenze überschreitet (Bd. I, S. 192).

Die Wicklungen sind jetzt noch auf die größte Potentialdifferenz benachbarter Lamellen zu prüfen. Diese Potentialdifferenz ist allgemein für jede Wicklung

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K} \left(\frac{p}{a}\right)_{+} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Betrachten wir zunächst nur die Wicklungen, bei welchen $\frac{p}{a}$ gleich einer ganzen Zahl ist, so wird

$$P_{dk} = \frac{\pi p P}{K} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Nun ist $N = 2wK$ und $N = \frac{\pi D}{i_a} \frac{AS}{} = \frac{\pi D}{J} \frac{AS}{} \frac{2a}{}$. Führen

Digitized by Google

wir den aus diesen Gleichungen erhaltenen Wert von K in die Gleichung (3) ein, so ergibt sich

$$P_{dk} = \frac{w\,P\,J}{D\;AS}\,\frac{p}{a} = \frac{w\,KW}{D\;AS}\,\frac{p}{a}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Hieraus geht hervor, daß bei einer Maschine, die für eine bestimmte Leistung mit gleichem AS und gleicher Windungszahl w pro Spule, jedoch für verschiedene Wicklungen oder Spannungen entworfen wird, P_{dk} umgekehrt proportional a ist. Weiter geht aus der Formel hervor, daß P_{dk} unabhängig von der Spannung der Maschine ist. Es ist bei Maschinen mit hoher Spannung nur die Frage, ob man die Lamellenzahl unterbringen kann. Die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators ist

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60 \cdot 100} = \frac{K \beta n}{60 \cdot 100}.$$

Führt man den aus dieser Gleichung erhaltenen Wert von K in die Formel (3) ein, so ergibt sich

$$P_{dk} = \frac{\pi P \beta}{v_k \cdot 100}\,\frac{pn}{60} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Nehmen wir im Maximum $P_{dk} = 35$ Volt und $v_k = 25$ m/sec und im Minimum $\beta = 0{,}32$ cm, so wird für $\frac{pn}{60} = 25$; $P = 3500$.

Da die Periodenzahl 25 den Verhältnissen normal gebauter Maschinen entspricht, so wird man bis zu einer Spannung von 3500 Volt noch mit normalen Typen auskommen. Werden höhere Spannungen verlangt, so ist die Periodenzahl zu verkleinern, indem man bei gegebener Tourenzahl die Polzahl verringert.

Wird bei einer Reihen- oder Reihenparallelwicklung die Potentialdifferenz benachbarter Lamellen zu groß und will man diese Wicklung doch beibehalten, so kann man diese Potentialdifferenz auf das $n$fache verkleinern, indem man die Anzahl der Lamellen auf das $n$fache vermehrt.

Für die Wicklungen, bei welchen $\frac{p}{a}$ nicht gleich einer ganzen Zahl ist, sind die Formeln 4 und 5 mit $\frac{a}{p}\left(\frac{p}{a}\right)_+$ zu multiplizieren.

45. Umfangsgeschwindigkeit und Tourenzahl.

Die gebräuchlichste Umfangsgeschwindigkeit normaler Maschinen mit Riementrieb beträgt 12 bis 17 m/sec, wobei der kleinere Wert für kleinere Maschinen von ca. 2 KW Leistung gilt. Für

Digitized by Google

langsam laufende, direkt gekuppelte Dynamos fällt v bis 8 m/sec und ausnahmsweise noch tiefer. Bei Gleichstrommaschinen, die direkt mit Dampfturbinen gekuppelt werden, gelangt man zu Umfangsgeschwindigkeiten bis 80 m/sec. In solchen Fällen müssen zum Festhalten der Ankerdrähte gegen die Zentrifugalkraft keilverschlossene Nuten verwendet und die Wicklungsteile außerhalb des Ankereisens durch besonders starke Bandagen oder Kappen gehalten werden.

Für normale Maschinen ist es nicht anzuraten, mit der Umfangsgeschwindigkeit über 30 m/sec zu gehen, da man dann zu besonderen Konstruktionen greifen muß, welche die Maschinen

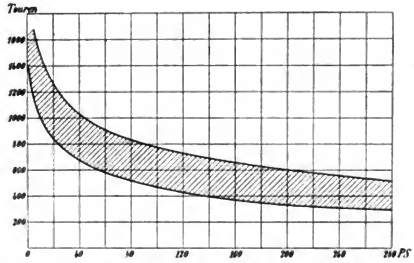


Fig. 307. Tourenzahlen normaler Motoren bis 280 PS.

wesentlich verteuern. Da die Umfangsgeschwindigkeit an die oben angegebenen Grenzen gebunden ist und der Ankerdurchmesser mit der Größe der Leistung zunehmen muß, muß im allgemeinen die Tourenzahl mit der Leistung abnehmen. In Fällen, wo die Gleichstromgeneratoren mit Turbinen, Dampfmaschinen, Dampfturbinen oder Gasmotoren direkt gekuppelt oder die Gleichstrommotoren direkt mit den Arbeitsmaschinen zu verbinden sind, ist die Tourenzahl innerhalb enger Grenzen vorgeschrieben. Ist die Wahl der Tourenzahl frei gelassen, was bei Riementrieb zutrifft, so ist man wegen der Riemengeschwindigkeit und der Verwendung der Dynamos als Motoren an gewisse Grenzen gebunden.

Fig. 307 zeigt die oberen und unteren Grenzwerte der Tourenzahlen für normale Motoren verschiedener Firmen bis 280 PS. Die meisten Firmen führen jedoch in ihren Listen neben diesen normalen Tourenzahlen noch eine Reihe andere, sowohl höhere als niedrigere Tourenzahlen auf.

Digitized by Google

46. Wahl des Verhältnisses von Ankerlänge zu Polbogen.

Sind AS, B_i und α_i für eine Maschine bestimmter Leistung und Tourenzahl gewählt, so ist, wie später gezeigt wird, das Produkt $D^2 l_i$ bekannt. Es handelt sich somit weiter darum, dieses Produkt in l_i und D zu zerlegen. Nimmt man bei gegebener Polzahl einen bestimmten Wert für das Verhältnis Ankerlänge zu Polbogen an, so sind hierdurch D und l_i bestimmt. Es ist daher zu prüfen, welches Verhältnis von Ankerlänge zu Polbogen das günstigste ist.

Die Leistung $E_a J_a$ kann man schreiben

$$E_a J_a = \frac{p n}{60} \frac{N}{a} \Phi J_a \cdot 10^{-8} = 2 p \Phi N i_a \frac{n}{60} 10^{-8} =$$

$$= (2 p \Phi)(\pi D \; AS) \frac{n}{60} 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Entwerfen wir verschiedene Maschinen für eine bestimmte Leistung und Tourenzahl mit gleicher Polzahl, jedoch mit verschiedenen Durchmessern, so wird, da $E_a J_a$ für diese Maschinen gegeben ist, bei gleichbleibendem AS der Kraftfluß Φ umgekehrt proportional dem Durchmesser D. Die Querschnitte des Ankers, der Magnete und des Joches sind bei gleicher Induktion somit ebenfalls umgekehrt proportional dem Durchmesser. Ändert man die radiale Höhe des Poles in gleichem Verhältnis wie den Durchmesser des Ankers, so bleiben die Gewichte der Eisenteile (Magnete, Anker und Joch) unabhängig vom Durchmesser, da ja der mittlere Durchmesser von Anker und Joch in demselben Verhältnis wächst als ihr Querschnitt abnimmt.

Wir müssen jetzt noch den Einfluß der Änderung des Durchmessers auf die Kupfergewichte untersuchen. Das Gewicht des Ankerkupfers ist gleich $l_a N q_a \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5}$ kg. Wir können jetzt schreiben

$$l_a N q_a = \frac{i_a N l_a q_a}{i_a} = \frac{\pi D \; AS}{s_a} l_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Hält man AS und s_a konstant, so ist das Kupfergewicht nur abhängig vom Produkte $D l_a$.

Schreiben wir $l_a = l_i + 1{,}5\,\tau$ und suchen wir, indem wir $D^2 l_i$ gleich einer Konstanten setzen, den Minimalwert des Ausdruckes $(l_i + 1{,}5\,\tau)\, D$ auf, so erhalten wir als Bedingung $l_i = 2 \cdot 1{,}5\,\tau$, d. h. die Wickellänge im Eisen gleich zweimal der freien Wickellänge. Dieses Verhältnis wird bei normalen Maschinen wohl kaum erreicht und man kann somit sagen, daß das Gewicht des Ankerkupfers um so kleiner wird, je größer das Verhältnis Ankerlänge zu Polbogen wird.

Digitized by Google

Wie wir später sehen werden (S. 254), ist die Größe des Luftspaltes bei Maschinen ohne künstliche Kommutation so zu wählen, daß $\frac{AW_l + AW_z}{b_i \; AS} \geqq 1{,}2$ ist. Nehmen wir für unseren Vergleich für dieses Verhältnis einen bestimmten Wert an, so ist $AW_l + AW_z$ bei gleichbleibendem AS proportional b_i. Da die Längen der übrigen Kreisteile proportional D und somit ebenfalls proportional b_i sind, so wird die totale Amperewindungszahl proportional b_i sein und deshalb auch der totale Kupferquerschnitt der Magnetwicklung. Da wir die Höhe proportional dem Durchmesser vergrößert haben, erhalten wir eine gleiche Dicke der Erregerspule bei verschiedenen Ankerdurchmessern.

Die mittlere Windungslänge der Magnetwicklung kann man bei gleichbleibender Querschnittsform des Magneten etwa proportional der Wurzel aus dem Magnetquerschnitte und somit auch umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Ankerdurchmesser setzen. Das Gewicht des Magnetkupfers ist somit etwa umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Durchmesser.

Fassen wir die Ergebnisse zusammen, so können wir sagen, daß das Gewicht des aktiven Eisens nur unwesentlich vom Verhältnis Ankerlänge zu Polbogen beeinflußt wird, während das Gewicht des aktiven Kupfers um so kleiner wird, je größer dieses Verhältnis ist.

Im Band I S. 523 haben wir gesehen, daß die Ankerkonstante $\frac{N}{K} l_i v \; AS \; 10^{-6}$ bei gleichbleibendem B_i für Maschinen bestimmter Leistung und Tourenzahl umgekehrt proportional D ist, d. h. daß mit Rücksicht auf eine günstige Kommutation ein kleiner Wert des Verhältnisses Ankerlänge zu Polbogen anzustreben ist. Bei Anwendung von Wendepolen fällt jedoch diese Einschränkung fort.

Außerdem sind die Abkühlungsverhältnisse bei einem langen Anker ungünstiger als bei einem kürzeren.

Weiter ist noch zu bemerken, daß wir bei der Ermittlung des Gewichtes des Magnetkupfers angenommen haben, daß die Querschnittform der Magnete die gleiche bleibe. Bei den größeren Werten des Verhältnisses Ankerlänge zu Polbogen wird die Querschnittsform der Magnete im allgemeinen mehr länglich werden und die mittlere Länge der Magnetwicklung wird schneller als proportional der Wurzel aus dem Querschnitt wachsen.

Für die Magnetkerne soll man mit Rücksicht auf die Herstellung wenn möglich die Kreisform wählen, um so mehr, als in diesem Falle auch die Herstellung der Spulenkasten und das Wickeln der Spulen sich am besten gestaltet.

Digitized by Google

In der Praxis haben sich folgende Verhältnisse als die günstigsten herausgestellt.

Bei Maschinen mit Radialpolen, deren Tourenzahl im Vergleich zu ihrer Leistung als normal betrachtet werden kann, ist das Verhältnis

$$\frac{l_i}{b_i} = 0{,}8 \text{ bis } 1{,}2.$$

Ist bei hohen Tourenzahlen die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers schon so groß gewählt, daß eine weitere Steigerung derselben nicht mehr erwünscht oder zulässig ist, und wird die geforderte Leistung der Maschine nur durch entsprechende Vergrößerung der Ankerlänge erreicht, so kann das Verhältnis von $l_i : b_i$ erheblich größere Werte annehmen. Ist umgekehrt der Ankerdurchmesser einer Maschine im Verhältnis zur Leistung groß, wie bei den Schwungradmaschinen, so kann $l_i : b_i$ erheblich kleiner sein. Die Ankerlänge wird bei normalen Maschinen ($v < 30$ m/sec) selten größer als 35 bis 45 cm. Bei kleinen zweipoligen Typen wird die Trommel nahezu quadratisch, d. h. $D \simeq l_i$, und bei großen Maschinen, mit Ausnahme der Schwungradmaschinen oder sehr langsam laufenden Maschinen, wo l_i oft unerwünscht klein ausfällt, liegt l_i meistens zwischen 25 und 35 cm.

47. Wahl der Polzahl.

Die Polzahl wird durch die Leistung, die Umdrehungszahl, die Ankerwicklung und das gewünschte Verhältnis von Pollänge zu Polbogen am wesentlichsten beeinflußt. Aber auch die Klemmenspannung und die Stromstärke können auf die Wahl der Polzahl von Einfluß sein.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Polzahl auf die Gewichte der aktiven Materialien wollen wir uns auf den Vergleich von Maschinen mit gleichem Durchmesser beschränken. Für jede Maschine ist dann nachträglich zu untersuchen, ob das Verhältnis $l_i : b_i$ ein günstiges ist.

Gehen wir von der Formel (6) S. 219

$$E_a J_a = (2p\,\Phi)(\pi D\ AS)\,\frac{n}{60}\,10^{-8}$$

aus, so ist hieraus ersichtlich, daß bei gleichbleibendem AS und D der totale Kraftfluß $2p\,\Phi$ und somit bei gleicher Induktion der Gesamtquerschnitt der Magnete von der Polzahl unabhängig ist. Bei gleichbleibender radialer Höhe der Magnetkerne ist ihr Gewicht von der Polzahl unabhängig.

Digitized by Google

Der Joch- und Ankerquerschnitt ist bei gleichbleibender Induktion umgekehrt proportional der Polzahl. Die Gewichte des Anker- und Jocheisens sind also umgekehrt proportional der Polzahl. Das gesamte Eisengewicht nimmt somit mit zunehmender Polzahl ab.

Der Hysteresisverlust im Ankereisen ist von der Polzahl unabhängig, da die Periodenzahl sich proportional und das Ankervolumen sich umgekehrt proportional mit der Polzahl ändert.

Das Gewicht des Ankerkupfers nimmt mit zunehmender Polzahl bei gleichbleibender Stromdichte s_a ab, da die Länge einer Ankerwindung kleiner wird.

Es bleibt noch zu untersuchen, wie sich der Aufwand an Magnetkupfer mit der Polzahl ändert.

Wir dürfen für diesen Vergleich, wie im vorigen Abschnitt angegeben, dem Verhältnis $\frac{AW_l + AW_z}{b_i \; AS}$ einen bestimmten Wert beilegen. Bei gleichbleibendem AS ist $AW_l + AW_z$ somit proportional b_i. Weiter sind die Kraftlinienlängen im Joch und im Anker proportional b_i und somit auch die Amperewindungen pro Kreis für das Joch und den Anker. Dagegen bleiben die Amperewindungen für die Magnete die gleichen. Da diese jedoch nur einen kleineren Prozentsatz der totalen Amperewindungen betragen, so können wir die Amperewindungen pro Kreis annähernd proportional b_i oder umgekehrt proportional der Polzahl setzen, so daß die totale Amperewindungszahl von der Polzahl unabhängig ist.

Bei gleichbleibender Querschnittsform des Magneten ist die mittlere Windungslänge der Magnetwicklung etwa proportional der Quadratwurzel aus dem Magnetquerschnitt, und da dieser Querschnitt umgekehrt proportional der Polzahl ist, so kann man die mittlere Windungslänge umgekehrt proportional der Wurzel aus der Polzahl setzen. Das Gewicht des Magnetkupfers nimmt somit mit zunehmender Polzahl ebenfalls ab.

Hieraus geht hervor, daß sämtliche aktiven Gewichte bei Zunahme der Polzahl abnehmen.

Es ist jedoch zu bemerken, daß sobald wir mit dem Luftspalt an die zulässige Grenze angelangt sind, das Kupfergewicht mit wachsender Polzahl zunehmen muß.

Ferner ist zu beachten, daß mit der Polzahl gewöhnlich auch die Kosten der Fabrikation wachsen, weil mehr Teile und Flächen zu bearbeiten sind, und daß die Wirbelstromverluste im Ankereisen und die Zahnverluste mit zunehmender Polzahl wachsen. Aus dem letzten Grunde wird man die Sättigung des Ankereisens und der Zähne bei der großen Polzahl kleiner wählen als bei der kleinen,

Digitized by Google

so daß im allgemeinen das Gewicht des Ankereisens fast unabhängig von der Polzahl wird.

Bei großen Maschinen muß das Joch außerdem mit Rücksicht auf die Steifigkeit und das Aussehen der Maschine einen erheblichen Querschnitt besitzen. Es hat daher bei solchen Maschinen wenig Wert, unter eine Polteilung von 45 bis 55 cm oder unter einen Polbogen von 34 bis 40 cm zu gehen. Bei etwa 35 cm Polbogen und Anwendung der Wellenwicklung mit Äquipotentialverbindungen kann bei großen Ankerdurchmessern auch ein Luftspalt δ erreicht werden, der aus mechanischen Gründen nicht wesentlich unterschritten werden darf.

Zweipolige Typen findet man nur noch für sehr kleine Leistungen und bei Turbogeneratoren. Fast alle Firmen bauen ihre kleineren Motoren von 0,5 PS an mit Rücksicht auf die bequemere Herstellung der Wicklung aus Formspulen vierpolig.

Ändern wir bei dem Übergang von einer Polzahl zur anderen auch den Ankerdurchmesser und die Ankerlänge, so ist es schwierig, im voraus zu sagen, welche Maschine die günstigere sein wird. Man wird dann am besten die Maschine für verschiedene Polzahlen durchrechnen, das Gewicht von Eisen und Kupfer, die Wattverluste, sowie den Herstellungspreis ermitteln und schließlich noch die Maschine auf Kommutation kontrollieren.

48. Ableitung der Formeln zur Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine.

Als gegeben sind P, J und n anzusehen. Bei Motoren ist gewöhnlich an Stelle von J die Leistung in PS gegeben, es muß dann durch eine vorläufige Annahme des Wirkungsgrades η die elektrische Leistung

$$KW = \frac{0{,}736 \cdot PS}{\eta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

oder

$$J = \frac{736 \cdot PS}{\eta P} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

berechnet werden.

Die Grundformel für die Vorausberechnung läßt sich in folgender Weise ableiten:

$$J_a = 2\,a\,i_a = \frac{2\,a}{N}\,\frac{\pi D}{}\,AS$$

$$E_a = \frac{pn}{60}\,\frac{N}{a}\,\Phi \cdot 10^{-8}$$

$$\Phi = B_l\,l_i\,b_i; \qquad b_i = \alpha_i \frac{\pi D}{2p}$$

Digitized by Google

$$KW = J_a E_a \cdot 10^{-3} = 2\pi D\ AS \frac{pn}{60} \Phi \cdot 10^{-11} =$$

$$= 2\pi D\ AS \frac{pn}{60} \cdot B_l l_i \alpha_i \frac{\pi D}{2p} 10^{-11} = (D^2 l_i n) \left(\frac{\alpha_i\ AS\ B_l}{6 \cdot 10^{11}}\right)$$

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i\ AS\ B_l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Diesen Quotienten nennen wir die **Maschinenkonstante**[1]). Solange B_l und AS unverändert bleiben, ist die rechte Seite eine Konstante, und da diese Größen B_l und AS ein Maß für die magnetische und elektrische Beanspruchung, also für die Ausnützung darstellen, ist die Maschinenkonstante eine charakteristische Größe.

Je kleiner die Konstante wird, um so kleiner sind die Dimensionen der Maschine im Verhältnis zur Leistung. Damit ist aber nicht gesagt, daß bei gegebener Leistung die Maschine mit dem kleinsten $\frac{D^2 l_i n}{KW}$ die billigste sei, weil hier das Verhältnis von Eisen zu Kupfer von großem Einfluß ist.

Bei gegebener Leistung und Tourenzahl kann man nach Festlegung von B_l und AS mit Hilfe der Grundformel 10 die Hauptabmessungen D und l_i ermitteln.

Das Verhältnis $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$ liegt für Maschinen ohne Wendepole bei zweipoligen Typen zwischen 0,6 und 0,7 und bei mehrpoligen Typen zwischen 0,65 und 0,75. Bei Wendepolmaschinen wird, um Platz für die Wendepole zu erhalten und die Streuung der Wendepole zu verkleinern, α_i kleiner gewählt. Man findet hier meistens Werte von α_i zwischen 0,5 und 0,7.

Ein großes Verhältnis α_i hat den Vorteil, daß ein großer Teil des Ankerumfanges magnetisch beaufschlagt und daher bei gegebenem B_l ein großer Kraftfluß Φ erhalten wird, dagegen werden die Bedingungen für eine gute Kommutation verschlechtert, da die Leitfähigkeit λ_q mit zunehmendem α_i wächst (S. 462, Bd. I) und das Feld um so steiler abfällt je größer α_i ist.

[1]) Der Verfasser benützt diese Beziehung zur Vorausberechnung von Maschinen schon seit vielen Jahren (s. ETZ. 1896, Seite 177 und ETZ. 1903, Seite 285).

J. K. Sumec schreibt in der Zeitschrift für Elektrotechnik 1898 dieselbe Beziehung wie folgt

$$KW = 10^{-11} v\ AS\ B_l \frac{b}{\tau} D\pi l$$

und drückt sie wie folgt in Worten aus, da sie der Gleichung Effekt = Geschwindigkeit × Kraft entspricht.

Mechanisch-elektrischer Energieumsatz = mechanische × elektrische × magnetische Beanspruchung × Gesamtpolfläche.

Digitized by Google

Für die Gestalt der Feldkurve in der Kommutierungszone ist der Wert von α_i zwar nicht direkt maßgebend, sondern die Größe der Pollücke $(\tau - b_i) = \tau(1 - \alpha_i)$ und die Sättigung der Polspitzen. Man kann daher auch die Größe der Pollücke annehmen, und es darf α_i um so größer sein, je größer die Polteilung τ ist.

Für die Luftinduktion B_l geben die folgenden Zahlen übliche Werte (siehe auch Tabelle I S. 230).

1. Gezahnte Anker und kleine Maschinen $B_l = 5000$ bis 7000
2. Gezahnte Anker und große Maschinen $B_l = 7000$ bis 11000
3. Glatte Anker und kleine Maschinen $B_l = 3000$ bis 5000
4. Glatte Anker und große Maschinen $B_l = 5000$ bis 8000

Bei Maschinen mit hoher Periodenzahl $\frac{pn}{60} > 25$ bis 30 z. B. Turbogeneratoren findet man erheblich kleinere Werte von B_l.

49. Größe der linearen Belastung AS und ihr Einfluß auf die Gewichte, die Verluste, den Wirkungsgrad und die Kommutierung.

Wir wollen annehmen, daß von einer Maschine bestimmter Leistung und Tourenzahl die Abmessungen des Ankers und die Polzahl festgelegt sind, und wollen untersuchen wie sich die Gewichte der aktiven Materialien mit AS ändern.

Aus der Formel (6) Seite 219

$$E_a J_a = (2p\,\Phi)(\pi D\ AS)\frac{n}{60}\,10^{-8}$$

geht hervor, daß in diesem Fall der Kraftfluß Φ umgekehrt proportional AS ist. Nimmt man eine bestimmte Höhe für die Magnete und einen bestimmten Durchmesser für das Joch an, so sind die Gewichte der Magnete und des Joches bei gleichbleibender Induktion ebenfalls umgekehrt proportional AS. Das Gewicht des Ankerkupfers ist gleich

$$G_{ka} = l_a q_a N \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = i_a N \frac{q_a}{i_a} l_a \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = \frac{\pi D\ AS\ l_a}{s_a} 8{,}9 \cdot 10^{-5} \quad (11)$$

Dieses Gewicht ist bei gleichbleibender Stromdichte s_a somit proportional AS.

Das Gewicht des Ankereisens ist nahezu unabhängig von der Größe von AS, weil die totalen Ankerverluste (Stromwärme- und Eisenverluste), wie wir später sehen werden, bei Änderung von AS nur in engen Grenzen schwanken und eine Änderung der Abmessungen des Ankereisens eine Änderung der Temperaturerhöhung hervorrufen würde.

Digitized by Google

Es ist schließlich noch zu untersuchen, wie sich das Gewicht des Magnetkupfers mit Änderung von AS ändert.

Nehmen wir wieder das Verhältnis $\frac{AW_l + AW_z}{b_i\ AS}$ als konstant an, so wächst die Amperewindungszahl $AW_l + AW_z$ proportional mit AS. Es werden somit die totalen Amperewindungen mit zunehmendem AS zunehmen. Die mittlere Windungslänge der Magnetwicklung wird jedoch mit Zunahme von AS abnehmen, da der Polquerschnitt der linearen Belastung AS umgekehrt proportional ist. Das Gewicht G_{km} des Magnetkupfers ergibt sich aus:

$$G_{km} = l_u q_u w_u \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = i_u w_u \frac{q_u}{i_u} l_u \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} =$$

$$= \frac{AW_l l_u \cdot 8{,}9}{10^5 s_u} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Bei gleichbleibender Stromdichte s_u ist das Gewicht somit proportional $AW_l l_u$, und da die mit zunehmendem AS notwendige Zunahme von AW_l prozentual die Abnahme von l_u überwiegt, so wird das Magnetkupfer mit zunehmendem AS zunehmen.

Um den Einfluß von AS auf die aktiven Materialien besser verfolgen zu können, wurden für eine 400 KW-Maschine mit 165 Touren und 260 Volt Spannung die Abmessungen des Ankers angenommen und die Maschine für verschiedene Werte von AS durchgerechnet. Die Induktion im Joch wurden gleich 12500 und die Induktion in den Magneten gleich 15700 gehalten und der Luftspalt so gewählt, daß bei allen Werten von AS das Verhältnis $\frac{AW_l + AW_z}{b_i\ AS}$ dasselbe blieb.

Die Änderung von AS wurde durch Änderung der Nutenzahl vorgenommen. Die angenommenen Abmessungen des Ankers sind: $D = 185$ cm, $D_i = 145$ cm, $l_1 = 31 + 5 = 36$ cm, $l_i = 34{,}3$ cm, $p = a = 6$, $b_i = 34$ cm, Nutenabmessungen $11{,}5 \times 30$ mm mit je 4 Stäben von 4×11 mm, das Verhältnis $\frac{AW_l + AW_z}{b_i\ AS} = 1{,}75$; die Magnethöhe mit Polschuh gleich 31 cm und der mittlere Durchmesser des Joches 265 cm.

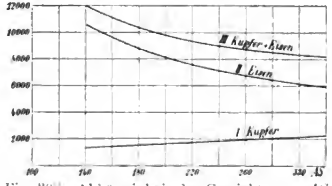


Fig. 308. Abhängigkeit der Gewichte von AS.

Die unter Annahme verschiedener AS gerechneten Gewichte sind in Fig. 308 aufgetragen.

Kurve I stellt das Gewicht des Anker- und Mag-

Digitized by Google

netkupfers dar, Kurve *II* das Gewicht des Magnet-, Joch- und Ankereisens und Kurve *III* die Summe dieser Gewichte. Wie ersichtlich, nimmt das Gesamtgewicht der aktiven Materialien mit Zunahme von AS ab. Da jedoch das Kupfer etwa fünf- bis achtmal so teuer wie das Eisen ist, so fällt beim Preis das Kupfer viel mehr ins Gewicht als das Eisen, und es wird der Preis der aktiven Materialien für ein bestimmtes AS ein Minimum aufweisen, das um so niedriger liegt, je höher das Verhältnis Kupferpreis zu Eisenpreis ist.

Wir wollen jetzt den Einfluß von AS auf die Verluste untersuchen und wieder wie oben annehmen, daß von einer Maschine bestimmter Leistung und Tourenzahl die Ankerabmessungen und die Polzahl festgelegt sind.

Der Verlust im Ankerkupfer ist gleich

$$W_{ka} = J_a^2 R_a$$

und es ist R_a der Ankerwiderstand

$$R_a = \frac{N l_a (1 + 0{,}004\, T_a)}{(2a)^2\ 5700 \cdot q_a}.$$

Wir können somit schreiben

$$W_{ka} = \left(\frac{J_a}{2a}\right)^2 \frac{N l_a (1 + 0{,}004\, T_a)}{5700 \cdot q_a}$$

$$= \frac{\pi D\, AS\, s_a}{5700}\, l_a (1 + 0{,}004\, T_a) \quad . \quad . \quad (13)$$

Aus der Formel ist zu ersehen, daß bei gleichbleibender Stromdichte der Stromwärmeverlust im Ankerkupfer proportional AS ist.

Bei zunehmendem AS nimmt der Kraftfluß Φ und somit B_l und bei gleichbleibendem Querschnitt des Ankereisens B_a ab. Es wird somit bei zunehmendem AS der Verlust im Ankereisen nach bekannten Gesetzen abnehmen. Wie sich die Zahninduktionen mit Änderung von AS ändern, ist nicht gleich zu sagen, da bei zunehmendem AS sowohl der Zahnquerschnitt wie die Luftinduktion abnimmt. Im allgemeinen wird für einen bestimmten Wert von AS die Zahninduktion ein Minimum sein. Der Verlust in den Ankerzähnen wird jedoch mit abnehmender Luftinduktion, d. h. bei Zunahme von AS abnehmen. Die Erregerverluste werden, wenn wir wie oben das Verhältnis $\frac{AW_l + AW_z}{b_i\, AS}$ konstant halten, mit zunehmendem AS ebenfalls zunehmen, da in diesem Falle die Amperewindungen wachsen.

Am besten kann man die Änderung der Verluste bei Änderung von AS an einem Beispiel überschen. Es sind für die oben er-

Digitized by Google

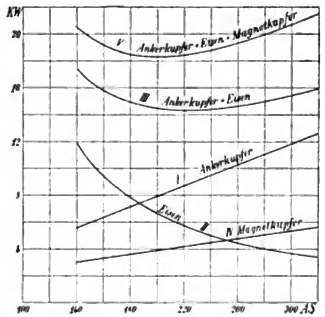


Fig. 309. Abhängigkeit der Verluste von *AS*.

wähnte 400 KW-Maschine die Verluste für verschiedene Werte von *AS* gerechnet worden. Bei der Berechnung ist der Hysteresiskoeffizient $\sigma_h = 1{,}5$ und der Wirbelstromkoeffizient $\sigma_w = 10$ angenommen.

In Fig. 309 sind die Verluste in Abhängigkeit von *AS* aufgetragen.

Kurve *I* stellt die Stromwärmeverluste im Ankerkupfer, *II* die Eisenverluste, *III* die gesamten Verluste im Anker, *IV* die Erreger- und Erregerverluste dar, *V* die Summe der Anker-verluste und Erregerverluste.

Wie aus Kurve *III* ersichtlich, schwanken die gesamten Ankerverluste innerhalb weiter Grenzen von *AS* nur wenig.

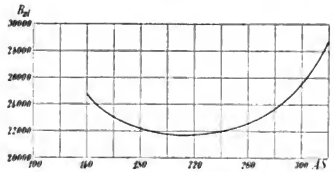


Fig. 310. Änderung der maximalen Zahninduktion mit *AS*.

Fig. 310 zeigt, wie sich die maximale Zahninduktion mit *AS* ändert.

Bei der Untersuchung des Einflusses von *AS* auf den Wirkungsgrad muß man sich aber vergegenwärtigen, daß nicht nur der Wirkungsgrad bei Vollast, sondern auch der Wirkungsgrad bei den anderen Belastungen von Wichtigkeit ist. Es besteht deshalb nicht allein die Aufgabe, einen möglichst kleinen Totalverlust bei Vollast anzustreben, sondern man muß auch darauf achten, wie die mit der Belastung veränderlichen Verluste sich zu den konstanten Verlusten verhalten.

Es wurden für drei Werte von *AS* (142, 214 und 321) die Wirkungsgradkurven gerechnet, wobei die Bürstenreibungsverluste = 2160 Watt und die Bürstenübergangsverluste bei Vollast = 2340 Watt angenommen wurden.

Die Kurven sind in Fig. 311 aufgetragen.

Kurve *I* entspricht *AS* = 142, Kurve *II* *AS* = 214 und Kurve *III* *AS* = 321.

Es zeigt sich hier ein großer Unterschied in dem Verlauf der

Digitized by Google

Kurven *I* und *III*. Bei der Kurve *III* ($AS = 321$) sind die konstanten Verluste klein und die Stromwärmeverluste in der Ankerwicklung groß, bei der Kurve *I* ($AS = 142$) liegen die Verhältnisse umgekehrt. Bei Vollast ist der Wirkungsgrad für $AS = 142$ (Kurve *I*) höher als für $AS = 321$ (Kurve *III*), jedoch liegt er für $AS = 142$ bei allen Belastungen unter $^3/_4$-Last niedriger. Arbeitet die Maschine nicht immer bei Vollast, sondern schwankt die Belastung etwa von $^1/_4$-Last bis Vollast, so wird der Tageswirkungsgrad (d. h. bei einem Generator das Verhältnis der abgegebenen Kilowattstunden zu der verbrauchten mechanischen Arbeit in Kilowattstunden) bei der Maschine mit $AS = 321$ bedeutend höher sein. Kurve *II* für $AS = 214$ liegt für Belastungen zwischen $^1/_2$- und $^1/_1$-Last höher als die beiden anderen Kurven und bei $^1/_4$-Last nur wenig unter der Kurve für $AS = 321$. Wenn somit die Maschine während längerer Zeit nicht unter $^1/_4$-Belastung arbeitet, so wird der Tageswirkungsgrad der Kurve *II* der höchste sein.

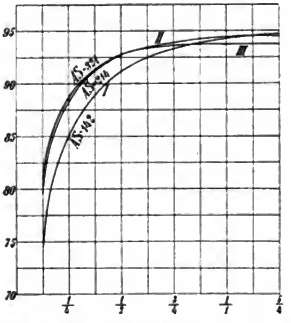


Fig. 311. Wirkungsgradkurven bei verschiedenen AS.

Die Wahl von AS wird somit durch die Art der Belastung wesentlich beeinflußt.

Was den Einfluß von AS auf die Kommutation betrifft, sei folgendes bemerkt.

Wie im Band I, Seite 523 erörtert wurde, hat die Ankerkonstante

$$\frac{N}{K} l_i v \; AS \cdot 10^{-6}$$

einen wesentlichen Einfluß auf die Größe der Kurzschlußspannung und der effektiven Reaktanzspannung.

Es läßt sich weiter (Bd. I, S. 523).

$$l_i v \; AS = \text{Konstante} \; \frac{KW}{\alpha_i D B_l}$$

schreiben. Aus dieser Formel geht hervor, daß, wenn wir für eine Maschine von bestimmter Leistung den Durchmesser D, die Luftinduktion B_l und das Verhältnis $\frac{N}{K}$ gewählt haben, die Ankerkon-

Digitized by Google

Tabelle I.

Lfd. Nr.	Leistung KW	Leistung PS	n	P Volt	p	v m/sec	l_1 cm	B_l	$B_{l\,max}$	AS	$\frac{N\,l_1 v A S}{K\,10^6}$	$c = \frac{p\,n}{60}$	B_n	B_m
1	—	2,6	2550	160	2	25,2	6,3	3630	12 800	96,5	0,122	85	8 850	10 400
2	—	12	2600	450	2	34,7	15,5	2980	13 900	105	0,33	86,5	5 500	8 500
3	—	8	750	240	2	10	15,5	5370	27 400	131	0,119	25	10 000	13 200
4	—	30	1200	220	2	18,8	19	5950	22 300	155	0,109	40	6 400	13 500
5	—	125	430	220	3	13,3	32	7150	19 800	226	0,19	21,5	9 900	15 700
6	—	240	500	600	3	18	32	8230	23 000	255	0,288	25	10 900	14 400
7	—	280	0–30	0—220	8	3,92	50	9100	23 900	240	0,092	4	12 400	13 100
8	5	—	1160	0—50	2	12,1	12	7040	24 800	110	0,031	38,5	13 800	17 800
9	6,4	—	1300	110	2	14,3	14	6000	20 400	114	0,0445	43,5	11 000	14 800
10	6	—	1100	150	2	13,4	12,5	4340	25 800	163	0,159	36,5	7 850	9 900
11	10,5	—	1200	230	2	17,00	10,9	6300	18 600	146	0,108	40	10 800	14 600
12	50	—	725	220	2	16,3	22	7300	20 000	226	0,157	24	10 100	12 600
13	72	—	550	120	3	16,1	20	7260	19 000	245	0,155	27,5	11 100	13 900
14	150	—	500	220	3	17,3	31	8550	23 500	231	0,232	25	13 900	14 500
15	175	—	450	230	3	17,6	28,4	8340	22 000	248	0,24	22,5	9 500	16 600
16	100	—	250	240	3	9,4	34,6	5600	19 500	327	0,213	12,5	11 400	15 600
17	107,5	—	225	500	4	10,4	26	8450	21 800	250	0,128	15	12 600	12 700
18	246	—	375	110	4	18,6	27,5	8000	24 100	300	0,30	25	10 800	14 500
19	350	—	500	260	4	27,5	31,5	10200	21 700	185	0,31	33,3	7 400	16 500
20	220	—	300	0—220	4	17,3	34	7850	17 700	185	0,21	20	10 900	15 400
21	350	—	200	2×(130—160)	6	16,8	30	8400	18 400	257	0,25	20	11 600	10 700
22	560	—	333	160	6	26,2	40	7100	19 300	253	0,52	33,3	7 200	15 800
23	210	—	120	260—350	5	9,45	33,8	7850	21 400	265	0,332	10	11 200	13 200
24	250	—	125	500	6	11,4	40	9000	24 600	190	0,34	12,5	10 100	16 100
25	600	—	276	560	5	21,7	40	8800	22 800	256	0,435	23	10 800	17 200
26	275	—	125	62,5	8	11,4	32	6800	17 700	273	0,196	16,7	6 500	14 100
27	270	—	100	115	8	10,2	31	9200	21 400	235	0,144	13,3	9 000	16 200
28	350	—	120	2×110	8	14,1	25	8750	20 600	244	0,167	16	12 300	15 500
29	360	—	120	500	6	11,2	33	8650	20 500	280	0,20	12	10 300	15 600
30	400	—	125	240	5	12,00	35	7500	20 800	360	0,288	10,4	11 500	15 600
31	400	—	110	480	5	11,5	45	9100	23 800	197	0,195	9,2	10 000	15 400
32	900	—	100	500—600	7	15,7	39	8200	21 000	288	0,34	11,7	7 500	13 600

Digitized by Google

Tabelle I.

G_{Eisen} kg	i_a Amp.	s_a	G_{ka} kg	G_{km} kg	$\Sigma(G_k)$ kg	$\frac{G_{km}}{G_{ka}}$	$\frac{G_{Eisen}}{\Sigma(G_k)}$	$\frac{2p\Phi}{i_a N}$	Firma
15	7,7	3	5,5	13,5	19	2,45	0,8	170	Ver. E.-A., Wien.
78	12	2,1	17,5	32	49,5	1,8	1,6	345	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
83,5	15	2,82	16	50	66	3,1	1,25	495	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
160	56	5,2	22	70	92	3,2	1,75	550	At. de Constr. El., Charleroi.
795	77	3,56	84	185	269	2,2	2,95	780	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
1025	160	5,55	75	330	405	4,4	2,5	730	At. de Constr. El., Charleroi.
9900	250	1,25	1610	2250	3860	1,4	2,55	1190	At. de Constr. El., Charleroi.
38,5	25	2,78	9	26	35	2,9	1,1	570	Siemens-Schuckertwerke.
50	29	2,6	11	40	51	3,6	1,00	550	Siemens-Schuckertwerke.
58	20	3,25	14	23	37	1,65	1,55	250	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
61	22,9	4,05	10	23	33	2,3	1,85	355	Ver. E.-A., Wien.
400	115	3,85	53	140	193	2,65	2,05	465	Ges. f. El. Ind., Karlsruhe.
435	100	3,00	82,5	215	297,5	2,6	1,45	440	Fab. el. Masch. vorm. A. Ebert.
1040	115	2,76	132	380	512	2,9	2,05	805	Siemens-Schuckertwerke.
1090	128	3,28	140	610	750	4,35	1,8	710	Ver. E.-A., Wien.
935	210	2,8	190	420	610	2,2	1,5	465	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
1135	110	2,8	176	270	446	1,55	2,55	615	Ganz'sche E.-A.-G.
1430	140	4	166	375	541	2,25	2,65	510	Elektr.-Ges. Alioth.
2370	170	3,15	165	500	665	3,00	3,6	1160	Ges. f. El. Ind., Karlsruhe.
2090	125	3	190	500	690	2,6	3,05	1100	At. de Constr. El., Charleroi.
3040	170	2,88	360	540	900	1,5	3,4	655	At. de Constr. El., Charleroi.
3110	146	2,87	370	1240	1610	3,35	1,9	725	Maschinenfabrik Oerlikon.
3070	80	2,78	420	1280	1700	3,05	1,8	695	Comp. Gén. El., Nancy.
3610	41,5	3,2	320	1100	1420	3,45	2,55	1130	Maschinenfabrik Oerlikon.
3700	168	2,7	440	1800	2240	4,1	1,65	915	Maschinenfabrik Oerlikon.
3070	138	2,2	520	700	1220	1,35	2,5	610	E.-A.-G. vorm. Kolben & Co.
4000	150	2,68	430	1080	1510	2,5	2,65	830	Ges. f. El. Ind., Karlsruhe.
3210	100	3,1	450	920	1370	2,05	2,35	610	Sachsenwerk.
4480	120	3,2	445	1100	1545	2,45	2,9	765	At. de Constr. El., Charleroi.
3330	168	2,52	850	1030	1880	1,21	1,75	470	Comp. Gén. El., Nancy.
8850	86	2,4	640	1800	2440	2,8	3,6	1500	At. de Constr. El., Charleroi.
13250	129	3,7	850	3540	4390	4,15	3,00	770	Elektr.-Ges. Alioth.

Digitized by Google

stante festgelegt ist, und unabhängig von der Wahl von AS ist; denn wenn wir AS ändern, so muß l_i sich umgekehrt proportional AS ändern, damit B_l konstant bleibt.

Sind jedoch von einer Maschine die Ankerabmessungen und somit l_i und v gegeben, so ist die Ankerkonstante direkt AS proportional, und es wird ein kleines AS und somit ein hohes B_l für die Kommutation günstiger sein.

Bei Maschinen mit künstlicher Kommutation ist AS nur mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad, den Preis, die Zahnsättigung und die zulässige Erwärmung der Maschine zu wählen.

Bei Maschinen, die nur für kurze Zeit großen Belastungen ausgesetzt sind, ist die künstliche Kommutation von besonderem Vorteil, da bei diesen AS sehr hoch gewählt werden kann, weil die Verluste, welche die Erwärmung hervorrufen, nur während kürzerer Zeit auftreten. Man wird somit bei Anwendung von Kompensationswicklung oder Wendepolen mit einer viel kleineren Type auskommen als ohne diese Hilfsmittel, da im letzteren Fall AS mit Rücksicht auf die Funkenbildung begrenzt ist.

Für Maschinen ohne künstliche Kommutation bewegt sich der Wert von AS für bestimmte Maschinentypen und gewisse Maschinengrößen nur innerhalb kleiner Grenzen. Für kleinere Maschinen schwankt AS etwa zwischen 150 und 250, während man bei größeren Maschinen bei sorgfältiger Dimensionierung mit AS bis etwa 300 gehen kann.

In Tabelle I sind für eine Reihe von Maschinen (sämtliche ohne Wendepole) Angaben über AS, B_l und $\frac{N}{K} l_i v AS \cdot 10^{-6}$ gemacht. G_{Eisen} bezeichnet das Gewicht der Ankerbleche und der Magnetpole; das Joch ist nicht mit inbegriffen, da dasselbe bald aus Stahlguß und bald aus Gußeisen besteht. G_{ka} bezeichnet das Gewicht des Armaturkupfers, G_{km} das Gewicht des Magnetkupfers und $\Sigma(G_k)$ die Summe beider Gewichte.

Zu den Tabellenwerten, die ausgeführten Maschinen entnommen sind, ist jedoch zu bemerken, daß dieselben nicht durchweg den höchsten Anforderungen hinsichtlich eines geringen Kupferaufwandes für die Magnetwicklung und einer bis an die zulässige Grenze gewählten linearen Belastung AS entsprechen.

Digitized by Google

Zwölftes Kapitel.

50. Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine. — 51. Berechnung der Eisenlängen l und l_i und des Polbogens b. — 52. Berechnung der Zahl der Ankerdrähte und der Zahl der Lamellen des Kommutators. — 53. Berechnung des Querschnittes q_a der Ankerdrähte. — 54. Berechnung der Nuten. — 55. Berechnung der Eisenhöhe h des Ankers. — 56. Abmessungen des Kommutators und der Bürsten.

50. Berechnung der Hauptabmessungen der Maschine.

Als Ausgangspunkt für die Berechnung dient die Formel 10 auf Seite 224:

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l \, AS}.$$

Hierin bedeutet $KW = \frac{E_a J_a}{1000}$; J_a und E_a sind erst nach Durchrechnung der Maschine bekannt, man kann jedoch hier bei der vorläufigen Festlegung von D und l_i setzen $KW = \frac{PJ}{1000}$.

Mit Hilfe der über α_i, B_l und AS gemachten Angaben oder unter Benützung der Maschinenkonstanten ausgeführter Maschinen kann das Produkt $D^2 l_i$ aus Gl. 10 gefunden werden.

In der Haupttabelle Abschnitt 79, sind die Werte der Maschinenkonstanten berechnet, und in der Fig. 312 sind zwei Kurven aufgezeichnet, welche die Abhängigkeit von der Leistung darstellen. Die Kurven gelten für offen gebaute Maschinen ohne künstliche Kommutierung. Die obere Kurve gilt für Leistungen bis 60 KW und bis 220 Volt; für 500 Volt liegt die Kurve etwas höher. Die untere Kurve entspricht Maschinen von 60 bis 1000 KW; zwischen 100 und 1000 KW bewegt sich die Maschinenkonstante $\frac{D^2 l_i n}{KW}$ nur zwischen $45 \cdot 10^4$ und $35 \cdot 10^4$.

Man wird finden, daß ausgeführte Maschinen Werte ergeben, die öfter höher als tiefer liegen, weil die Kurven gut ausgenutzten

Digitized by Google

Maschinen entsprechen. Die Höhe der Klemmenspannung hat bei den großen Maschinen auf die Maschinenkonstante nur einen geringen Einfluß.

Wird ein Satz gleichartiger Maschinen entworfen, so gibt die Aufstellung dieser Kurve die Möglichkeit, die Gleichmäßigkeit der Berechnung der einzelnen Größen zu prüfen, obwohl es nicht erforderlich oder gut erreichbar ist, daß alle Werte auf einer stetigen Kurve liegen.

Für Maschinen mit mäßiger Umfangsgeschwindigkeit und künstlicher Kommutierung sinkt die Maschinenkonstante bis auf etwa $25 \cdot 10^4$.

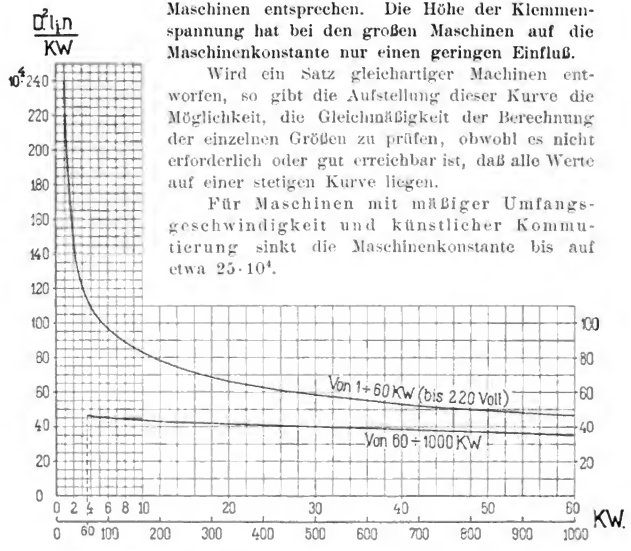


Fig. 312. Werte von $\frac{D^2 l_i n}{KW}$ für offen gebaute Maschinen ohne künstliche Kommutierung.

Bei Maschinen mit großen Umfangsgeschwindigkeiten wird dagegen wegen der schwierigeren Kommutation und Kühlung auch bei künstlicher Kommutation die Maschinenkonstante größer als nach Fig. 312.

Die Maschinenkonstante von Turbogeneratoren, System Déri, hat annähernd die in Fig. 313 dargestellten Werte.

Wir haben nunmehr $D^2 l_i$ passend in D und l_i zu zerlegen.

Ist die maximale zulässige Umfangsgeschwindigkeit des Ankers gegeben, wie z. B. bei sehr rasch laufenden großen Maschinen oder Schwungraddynamos, so findet man

$$D = \frac{6000 \cdot v}{\pi n}$$

Digitized by Google

und

$$l_i = \frac{(D^2 l_i)}{D^2}.$$

Man bestimmt nun die Polzahl so, daß eine passende Größe des Polbogens erhalten wird.

In allen Fällen, wo man mit v an einen bestimmten Wert nicht gebunden ist, verfährt man besser wie folgt: Man wählt einen Wert l_i und berechnet folgende Tabelle:

Gewählt	Berechnet							
l_i	$D = \sqrt{\frac{D^2 l_i}{l_i}}$	$\tau = \frac{\pi D}{2p}$	$b_i = \alpha_i \tau$	$\frac{l_i}{b_i}$	$v = \frac{\pi D n}{60} 2p$	a	$i_a = \frac{J_a}{2a}$
...	.....	....	....	...	.....	..	..	....

Hierbei wird die Polzahl derart gewählt, daß die Polteilung τ einen passenden Wert erhält (s. Seite 223).

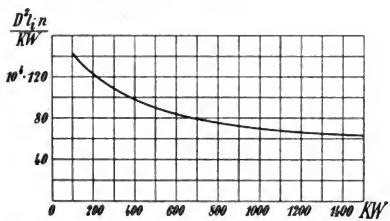


Fig. 313. Werte von $\frac{D^2 l_i n}{KW}$ für Turbogeneratoren System Déri.

Es sollen nun für diesen Wert von τ das Verhältnis $l_i : b_i$ und v ebenfalls brauchbare Werte ergeben.

Es wäre Zufall, wenn alle gewünschten Bedingungen bei der ersten Wahl von l_i erfüllt würden, man muß daher D und l_i so lange ändern, bis das der Fall ist.

Wie früher (S. 221) erörtert, soll, wenn möglich, das Verhältnis $\frac{l_i}{b_i}$, bei Maschinen mit radial angeordneten Außenpolen = 0,8 bis 1,2, bei dem Hufeisen- und Manchestertyp = 0,7 bis 1,2 sein, und der Polkern, der die Magnetspulen trägt, soll, wenn möglich, einen kreisförmigen Querschnitt haben.

Ist man mit der Umfangsgeschwindigkeit an der erlaubten Grenze angelangt, so kann l_i so groß werden, daß das obige Ver-

Digitized by Google

hältnis nicht mehr eingehalten werden kann. Wenn möglich soll für Maschinen ohne künstliche Kommutierung $l_i \leqq 40$ cm sein.

Es kann jetzt noch geprüft werden, ob die Ankerkonstante

$$\frac{N}{K} l_i v A S \cdot 10^{-6}$$

einen brauchbaren Wert erhält.

Damit sind die Hauptdimensionen der Maschine vorläufig festgelegt. Man kann sie noch schneller ermitteln, wenn man die Abmessungen von bereits gebauten guten Maschinen oder von sorgfältig berechneten Maschinen als Ausgangspunkt wählt.

51. Berechnung der Eisenlängen l und l_1 und des Polbogens b.

Wenn n_s die Zahl der Luftschlitze und b_s die Breite eines solchen bedeuten, so wird

$$l_1 = l + n_s b_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Weiter ist (Bd. I, S. 277)[1]), wenn die Pollänge gleich der Ankerlänge ist und wenn wir den Kraftfluß der beiden Seitenflächen des Ankers gleich dem Kraftfluß eines Luftschlitzes setzen

$$l_i = \frac{l_1 + b_s}{k'_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

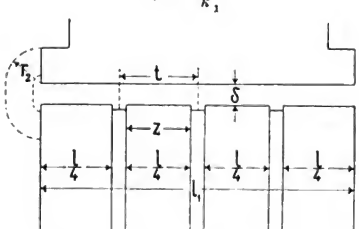


Fig. 314.

Es ist

$$k'_1 = \frac{t}{z + \lambda' \delta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Die Bedeutung der Größen t und z ist der Fig. 314 zu entnehmen.

[1]) In Bd. I wurde irrtümlicherweise im Zähler der Gl. 65 S. 277 l_i statt $l_i + b_s$ gesetzt.

Digitized by Google

In der Kurve Fig. 315 ist X' in Abhängigkeit von

$$\nu = \frac{l_1 - l}{\delta\, n_s}$$

aufgetragen.

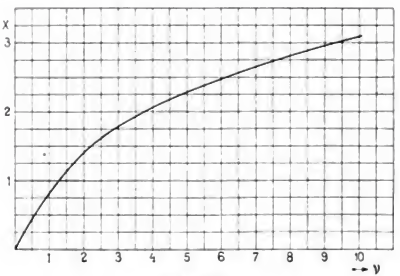


Fig. 315.

Mit Annäherung kann man auch

$$l_i = l + \left(\frac{1}{2} \text{ bis } \frac{2}{3}\right) n_s\, b_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

setzen, und wenn die Pollänge l_p kürzer als die Ankerlänge l_1 ist,

$$l_i = \frac{1}{2}\,(l_i' + l_p) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

worin l_i' aus Gl. 15 oder 17 zu berechnen ist.

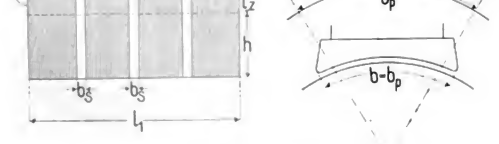


Fig. 316.

Die Eindrehungen in dem Ankereisen für die Drahtbänder lassen sich durch Einführung eines mittleren Luftraumes in die Rechnung berücksichtigen.

Digitized by Google

Um den Polbogen b zu bestimmen, muß zuerst die Polschuhform (s. Seite 533 u. 534, Bd. I) gewählt werden. Durch Aufzeichnen des Kraftlinienbildes und Berechnung der magnetischen Leitfähigkeit nach der auf Seite 275, Bd. I beschriebenen Weise kann man, da b_i bekannt ist, b finden. Für wenig gesättigte Polspitzen und symmetrische Polschuhe wird

$$b = b_i - 2 \cdot \delta \, k_1 \, k_2 \, \Sigma \frac{b_x}{\delta_x} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

wo $\Sigma \frac{b_x}{\delta_x}$ sich über eine Polspitze erstreckt.

Ist der Polschuh unsymmetrisch, so schreiben wir

$$b = b_i - \delta \, k_1 \, k_2 \, \Sigma \frac{b_x}{\delta_x} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

und erstrecken $\Sigma \frac{b_x}{\delta_x}$ über beide Polspitzen.

Für abgeschrägte Polspitzen ist b_i kleiner als der über die Spitzen gemessene Polbogen b_p, für stumpfe nicht abgeschrägte Polspitzen wird $b_i > b_p$.

Für angenäherte Rechnungen genügt es, b und b_p, ausgehend von b_i, schätzungsweise anzunehmen.

52. Berechnung der Zahl der Ankerdrähte und der Zahl der Lamellen des Kommutators.

Die Zahl der Ankerdrähte wird

$$N = \frac{\pi \, D \, AS}{i_a} = \frac{2 \pi \, D \, AS \, a}{J_a} \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Bei Nebenschlußmaschinen ist

$$i_a = \frac{J + i_n}{2a} = \frac{J_a}{2a}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

worin das negative Vorzeichen für Motoren gültig ist.

Die Erregerstromstärke im Nebenschluß i_n muß zunächst geschätzt werden; auf eine große Genauigkeit kommt es hierbei nicht an.

Hierzu dienen die in Fig. 317 gegebenen Kurven, welche den Erregerstrom in % des Gesamtstromes abzulesen gestatten.

Die Zahl der Lamellen

$$K = \frac{N}{2w}.$$

Digitized by Google

Bei Stabankern ist gewöhnlich die Windungszahl einer Spule $w = 1$ und

$$K = \frac{N}{2}.$$

Wir sehen hieraus, daß die Zahl der Ankerstromzweige $2a$ bezw. der Ankerzweigstrom i_a auf die Größen N und K einen bestimmten Einfluß ausübt. Bei der Wahl von a muß daher geprüft werden, ob die entsprechenden Werte von N und K brauchbar sind. Hierbei kommen folgende Gesichtspunkte in Betracht.

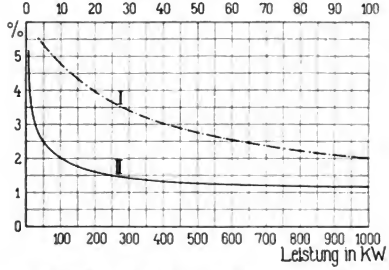


Fig. 317. Gesamte Erregerverluste in Proz. von der Leistung oder Erregerstrom in Proz. des Gesamtstromes.
Kurve I gilt für den oberen Maßstab.
Kurve II gilt für den unteren Maßstab.

a) Bei Ankern mit Stabwicklung soll die Ankerstromstärke i_a wenn möglich mindestens 60 bis 80 Ampere betragen, damit noch ein Stab von genügendem Querschnitt erhalten wird. Wird i_a kleiner als 60 Ampere, so kann eine Drahtwicklung ausgeführt werden, obwohl verschiedene Firmen auch noch Stabwicklung bis herunter auf 30 Ampere verwenden. Die Wahl eines möglichst großen Ankerstromes i_a kann bei Parallelwicklungen mit $2a = 2p$ Ankerstromzweigen die Wahl einer kleinen Polzahl mit großen Polbogen zur Folge haben.

b) Hinsichtlich der Nutenzahl oder der Anordnung der Spulenseiten ist es günstig, um eine große gegenseitige Dämpfung der kurzgeschlossenen Spulenseiten zu erhalten, mehrere Drähte (4, 6, 8) in einer Nut anzubringen. Damit jedoch die Lagen der Spulen einer Nut während des Kurzschlusses im magnetischen Felde nicht allzu verschieden werden, darf das Stromvolumen einer Nut nicht größer als etwa 900 sein. Es würde demnach bei

Digitized by Google

4 Stäben pro Nut $i_a \leqq 225$ Ampere
6 Stäben pro Nut $i_a \leqq 150$ Ampere
8 Stäben pro Nut $i_a \leqq 115$ Ampere.

Bei schwierigen Bedingungen für die Kommutierung werden jedoch bei größeren Stromstärken i_a am besten nur zwei Spulenseiten in eine Nut gelegt.

c) Ferner darf die Zahl der Nuten zwischen den Polspitzen eine gewisse Grenze nicht unterschreiten, damit die Variation der kommutierenden EMK nicht zu groß ausfällt. Es soll ungefähr

$$(1-\alpha_i)\frac{Z}{2p} > 3 \text{ bis } 4 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

sein, wo Z die Nutenzahl bedeutet.

d) Die Drahtzahl N bezw. die Lamellenzahl K muß so groß sein, daß die maximale Potentialdifferenz benachbarter Lamellen

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K}\left(\frac{p}{a}\right)_+ \leqq \mathbf{25 \text{ bis höchstens } 35 \text{ Volt}}$$

ist. Wenn möglich soll man mit P_{dk} nicht über 20 Volt gehen.

e) Mit Rücksicht auf die Kommutation darf mit i_a nicht über eine gewisse Grenze hinausgegangen werden, denn die Dämpfung durch gegenseitige Induktion ist bei gegebener Bürstenbreite um so größer, je mehr Lamellen bedeckt werden oder je kleiner das in den Kurzschluß ein- und austretende Stromvolumen im Verhältnis zum gesamten Stromvolumen $u_k i_a$ aller kurzgeschlossenen Spulen ist. Es soll also bei gegebenem Werte von $u_k i_a$ die Zahl der kurzgeschlossenen Spulenseiten u_k möglichst groß sein.

Bei Maschinen mit künstlicher Kommutation kommt diese Rücksicht weniger in Betracht.

f) Andererseits stellen sich die Herstellungskosten einer Maschine mit großen Werten von i_a und kleiner Lamellenzahl K billiger; man wird daher i_a so groß bezw. K so klein wählen, als es die Bedingungen für eine gute Kommutation gestatten.

g) Für Anker mit Drahtwicklung gibt die empirische Formel

$$K \geqq \mathbf{0{,}04 \text{ bis } 0{,}037\, N\sqrt{i_a}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

brauchbare Werte für K. Bei Trommelankern mit Stabwicklung ist $K = \frac{N}{2}$, und aus obiger Bedingung würde folgen,

$$i_a \leqq 150 \text{ bis } 180 \text{ Ampere.}$$

Bei günstigen Kommutierungsverhältnissen und zwei Spulenseiten pro Nut kann i_a bis 250 Amp. genommen werden, bei künstlicher Kommutation bis 500 und höher.

Digitized by Google

h) Die aus der Formel

$$N = \frac{\pi D \; AS}{i_a}$$

berechnete Drahtzahl bezw. die Lamellenzahl K muß auf einen solchen Wert nach oben oder unten abgerundet werden, daß die entsprechende Schaltungsformel erfüllt ist.

Damit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spulen immer nur ein Zahn liegt, soll (Bd. I, S. 101)

$$y_1 = u_n y_n + 1 - \frac{u_n}{2}$$

oder gleich der nächstliegenden ungeraden Zahl gemacht werden.

Wenn die Spulen einer Nut gemeinsam isoliert werden sollen, wie es vielfach üblich ist, so ist diese Bedingung nicht erfüllbar. In diesem Falle müssen die Seiten der Spulen, die in einer Nut beisammen sind, auch in der andern Nut beisammen bleiben, was nur zutrifft, wenn (Bd. I, S. 100)

$$y_1 = u_n y_n + 1$$

ist. Es gibt jetzt aufeinanderfolgende Spulen, zwischen welchen zwei Zähne liegen.

i) Werden Äquipotentialverbindungen angebracht, so ist man durch die Symmetriebedingungen an bestimmte Nutenzahlen gebunden. Die Symmetriebedingungen für Nutenanker wurden im Abschnitt 44 eingehend erörtert.

53. Berechnung des Querschnittes q_a der Ankerdrähte.

Es ist

$$q_a = \frac{i_a}{s_a} \text{ mm}^2.$$

Die Stromdichte s_a variiert zwischen weiten Grenzen. Es ist für sie die zulässige Erwärmung des Ankers und der Wirkungsgrad der Maschine maßgebend. Man kann jedoch die Stromdichte auf Grund der Erfahrung wählen und nachträglich die Erwärmung und den Wirkungsgrad prüfen.

In der Tabelle I S. 231 findet man für ausgeführte Maschinen die Stromdichte eingetragen. Bei größeren Maschinen, etwa über 100 KW, mit Stabankern und guter Ventilation, darf man mit der Stromdichte bis ungefähr 4 Amp/mm² gehen. Bei kleineren gut ventilierten Maschinen mit Blechpolen kann man die Stromdichte bedeutend höher nehmen, so findet man Ausführungen mit 5,0 bis 6,0 Amp/mm² bis etwa 30 KW und 4,0—5,0 Amp/mm² bis etwa 100 KW.

Digitized by Google

Die Abhängigkeit der Stromdichte von der Erwärmung läßt sich ausdrücken, indem wir pro 1 Watt Stromwärmeverlust eine bestimmte Abkühlungsfläche a_{ak} fordern. Der Stromwärmeverlust pro cm² Ankeroberfläche ergibt sich für AS Ampere, den Querschnitt q mm² pro cm Ankerumfang und den spez. Widerstand des warmen Kupfers $\frac{1}{48}$ zu

$$w_{ak} = AS^2 \frac{0{,}01}{48 \cdot q},$$

oder da

$$\frac{AS}{q} = s_a,$$

$$w_{ak} = \frac{AS\, s_a}{4800} \quad \ldots \ldots \quad (25)$$

Die Abkühlungsfläche pro 1 Watt Verlust auf Stillstand reduziert wird somit

$$a_{ak} = \frac{4800\,(1 + 0{,}1 \cdot v)}{s_a\, AS} \quad \ldots \ldots \quad (26)$$

oder

$$s_a = \frac{4800\,(1 + 0{,}1 \cdot v)}{a_{ak}\, AS} \quad \ldots \ldots \quad (27)$$

In der nachfolgenden Tabelle sind für eine Zahl von ausgeführten Maschinen die Werte a_{ak} berechnet.

Mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad der Maschine kann auch von vornherein ein bestimmter Wattverbrauch W_{ka} im Ankerkupfer angenommen und daraus s_a berechnet werden.

Man findet dann (s. Gl. 13, S. 227)

$$s_a = \frac{4800\, W_{ka}}{N l_a i_a} \quad \ldots \ldots \quad (28)$$

worin l_a die halbe Länge einer Ankerwindung in cm bezeichnet.

Annähernd ist für Trommelwicklung

$$l_a \simeq l_1 + 1{,}4\,\tau + 5 \quad \ldots \ldots \quad (29)$$

Das Kupfergewicht des Ankers ergibt sich aus Gl. 28

$$G = \frac{0{,}43 \cdot W_{ka}}{s_a^2}\ \text{kg} \quad \ldots \ldots \quad (30)$$

Der Ohm'sche Widerstand der Ankerwicklung ist (siehe Seite 665, Bd. I)

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a (1 + 0{,}004\, T_a)}{5700 \cdot q_a} \quad \ldots \ldots \quad (31)$$

Digitized by Google

Tabelle für $a_{ak} = \frac{4800\,(1 + 0{,}1 \cdot v)}{s_a\ AS}$.

Lfd. Nr.[1])	Leistung KW	Leistung PS	a_{ak}	Lfd. Nr.[1])	Leistung KW	Leistung PS	a_{ak}
1	—	2,6	58,5	17	107,5	—	14,7
2	—	12	97	18	246	—	11,4
3	—	8	26	19	350	—	31
4	—	30	17,1	20	220	—	23,6
5	—	125	13,9	21	350	—	17,4
6	—	240	9,5	22	560	—	24
7	—	280	22,2	23	210	—	12,7
8	5	—	34,6	24	250	—	16,8
9	6,4	—	39	25	600	—	22
10	6	—	21,2	26	275	—	17,1
11	10,5	—	21,9	27	270	—	15,4
12	50	—	14,5	28	350	—	15,3
13	72	—	17	29	360	—	11,3
14	150	—	20,6	30	400	—	11,6
15	175	—	16,3	31	400	—	21,8
16	100	—	10,2	32	900	—	11,6

oder für eine Temperaturerhöhung T_a von 45° über ca. 15° C

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a}{4800 \cdot q_a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

Der Spannungsabfall im Anker, bedingt durch den Ohm'schen Widerstand, wird gleich

$$J_a R_a = 2a\, i_a\, R_a = \frac{N}{2a} \cdot \frac{l_a\, s_a}{4800} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

und ist somit der Stromdichte proportional.

54. Berechnung der Nuten.

Die Abmessungen der Nuten müssen verschiedenen Bedingungen genügen. Erstens muß der berechnete Querschnitt der Ankerdrähte mit einer für die betreffende Spannung ausreichenden Isolation in den Nuten Platz finden, ohne daß die Zahnsättigung die zulässige Grenze überschreitet.

Zweitens soll die magnetische Leitfähigkeit der Nut λ_n möglichst klein sein.

[1]) Die laufenden Nummern stimmen mit denen der Tabelle Abschn. 79, überein.

Digitized by Google

Die Zahl der Spulenseiten s bezw. die Stabzahl N sowie die Zahl u_n der Seiten pro Nut sind bekannt.

Die Nutenzahl wird

$$Z = \frac{s}{u_n} = \frac{N}{u_n}$$

und die Nutenteilung

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z}.$$

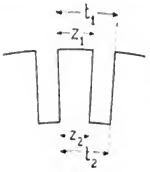


Fig. 318.

Um nun die Dimensionen der Nut (Fig. 318) zu bestimmen, gehen wir am besten von dem erforderlichen Querschnitt der Zähne am Fuße aus.

Es ist die maximale ideelle Zahninduktion im Zahnfuß (Bd. I, S. 281):

$$B_{zimax} = \frac{t_1 \Phi_a}{k_2 z_2 l b_i},$$

und da

$$\Phi_a = B_l b_i l_i$$

ist, so kann man auch schreiben

$$B_{zimax} = \frac{t_1 B_l}{k_2 z_2} \frac{l_i}{l}.$$

Hieraus folgt

$$z_2 = \frac{t_1 B_l l_i}{k_2 B_{zimax} l}.$$

Aus der Tabelle I Seite 230 ist ersichtlich, welche Werte B_{zimax} annimmt. Bei normalen Generatoren ist meistens

$$B_{zimax} < 23000$$

und etwa = 19000 bis 22000.

Wird die maximale Zahninduktion größer als diese Werte gewählt und ist die Blechsorte nicht von guter Qualität, was leicht vorkommen kann, so steigt die Amperewindungszahl AW_z und daher der Kupferverbrauch der Magnetwicklung derart rasch an, daß eine andere Dimensionierung der Nuten bezw. größere Eisendimensionen des Ankers vorzuziehen sind. Außerdem vergrößert eine hohe Zahninduktion die Wirbelströme in massiven Ankerstäben ganz erheblich.

Bei großen Periodenzahlen kann auch die Verkleinerung des Hysteresisverlustes der Zähne eine Verminderung der Zahninduktion bedingen, weil sonst der gewünschte Wirkungsgrad nicht erreicht oder weil die Erwärmung der Maschine zu groß wird.

Wenn es sich jedoch darum handelt, der Maschine möglichst kleine Abmessungen zu geben, wie z. B. bei Bahnmotoren, so wird

Digitized by Google

mit B_{zimax} unter Verwendung bester Blechsorten erheblich höher und zwar bis ca. 28000 gegangen.

Wenn z_2 berechnet ist, so ist dadurch auch die Nutenbreite ungefähr festgelegt. In der Wahl der Nutenhöhe sind wir jedoch noch frei. Mit Rücksicht darauf, daß der Streukraftfluß durch die Nut nicht zu groß wird, wählt man bei gewöhnlichen Maschinen das Verhältnis Nutenhöhe zu Nutenbreite selten über 4. Ist es unter dieser Bedingung nicht möglich, das Kupfer unterzubringen, so kann man versuchen, ob man bei Anordnung mehrerer Spulenseiten pro Nut günstigere Verhältnisse bekommt. Ist auch in dieser Weise eine passende Lösung nicht möglich, so sind entweder B_{zimax}, oder AS, oder s_a, oder B_l und infolgedessen event. auch die Hauptdimensionen D und l_i oder mehrere dieser Größen zugleich zu ändern.

Bei Maschinen mit künstlicher Kommutation hat man die Bedingung, daß das Verhältnis Nutenhöhe zu Nutenbreite kleiner als 4 zu wählen ist, nicht zu berücksichtigen. Es wird dadurch möglich, ein großes AS auf dem Anker unterzubringen, ohne daß die Zahninduktion zu hoch wird.

55. Berechnung der Eisenhöhe h des Ankers.

Bezeichnet B_a die Ankerinduktion, so wird die Eisenhöhe ohne Zahnhöhe

$$h = \frac{\Phi_a}{2 \cdot k_2 \, l \sqrt{B_a}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

und die totale Eisenhöhe $= h +$ Zahnhöhe. Die Werte von k_2 sind in Abschnitt 10, S. 38 angegeben.

Bei der Wahl von B_a ist die Größe des entstehenden Eisenverlustes durch Hysteresis und Wirbelströme zu berücksichtigen. Bei gegebener Periodenzahl $c = \frac{p\,n}{60}$ und konstantem Kraftflusse Φ ist der Hysteresisverlust annähernd umgekehrt proportional der 0,6ten Potenz des Eisenvolumens oder der $\sqrt[1]{h}$.

In der Tabelle I S. 230 sind für verschiedene Maschinengrößen und Periodenzahlen übliche Werte von B_a angegeben. Demnach ist ungefähr für

$\frac{p\,n}{60}$	B_a
5 bis 20	16000 bis 12000
20 „ 30	13000 „ 10000
30 „ 60	11000 „ 8000
60 „ 100	9000 „ 5000

Digitized by Google

Bei kompensierten Maschinen für Tourenregulierung durch Änderung des Hauptfeldes treten die größten Eisenverluste bei der kleinsten Tourenzahl auf. Es ist die Tourenzahl oder die Periodenzahl c umgekehrt proportional dem Felde Φ, so daß das Produkt $c B_a =$ konstant ist. Die Wirbelstromverluste sind somit für alle Tourenzahlen die gleichen. Die Hysteresisverluste sind proportional dem Produkte $c B_a^{1,6} = (c B_a)^{1,6} : c^{0,6}$ und nehmen somit mit zunehmender Tourenzahl ab. Die gleiche Überlegung gilt für die Zahnverluste.

Bei Maschinen, deren Ankeramperewindungen nicht kompensiert sind, treten die größten Eisenverluste nicht immer bei der kleinsten Tourenzahl auf, weil man hier die Vergrößerung der Induktionen durch das Ankerfeld nicht vernachlässigen darf. Um einen Anhalt über die Größe des von den Ankeramperewindungen hervorgerufenen Kraftflusses zu erhalten, können wir annehmen, daß die Feldkurve des Ankerfeldes unter den Polen geradlinig verläuft. Diese Annahme ist um so mehr zulässig, als im allgemeinen der Einfluß des Ankerfeldes am stärksten auftritt, wenn das Hauptfeld und somit die Zahnsättigungen klein sind.

Die maximale Induktion des Ankerfeldes ist

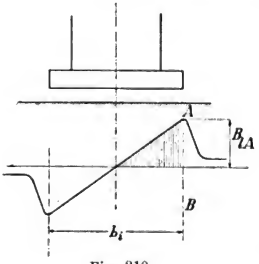


Fig. 319.

$$B_{lA} = \frac{b_i \; AS}{1{,}6 \cdot k_1 \, \delta}.$$

und da

$$B_l = \frac{A W_l}{1{,}6 \cdot k_1 \, \delta},$$

können wir auch schreiben

$$B_{lA} = \frac{b_i}{A W_l} \frac{AS}{} B_l.$$

Der von den Ankeramperewindungen erzeugte Kraftfluß pro Polpaar ist unter Berücksichtigung des Kraftflusses in der neutralen Zone etwa gleich 2,6 mal der in Fig. 319 schraffierten Fläche und ergibt sich somit zu:

$$\Phi_A = \frac{1{,}3 \, b_i \; AS}{2 \cdot A W_l} B_l \, l_i \, b_i = \frac{1{,}3 \, b_i}{2 \cdot A W_l} \frac{AS}{} \Phi \quad . \quad . \quad (35)$$

Dieser Kraftfluß bedingt in dem Ankerquerschnitt CD (Fig. 320) eine Induktion

$$B_{aA} = \frac{\Phi_A}{2 \cdot k_2 \, l \, h} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Digitized by Google

Bei Belastung erhalten wir die Verteilung der Induktion im Anker, indem wir über das Ankerfeld das Hauptfeld lagern. Es ist jedoch unmöglich, eine einfache Formel für die maximale Ankerinduktion bei Belastung zu finden. Wir wollen uns somit damit begnügen, die Verluste mit B_a zu rechnen, jedoch nur so lange, als $B_{aA} < B_a$ ist. Ist $B_{aA} > B_a$, so sind die Kernverluste mit B_{aA} zu rechnen. Der Fall $B_{aA} > B_a$ tritt ein, sobald $1{,}3\, b_i\, AS > 2\, AW_i'$ wird.

Auch den Einfluß des Ankerfeldes auf die Hysteresis- und Wirbelstromverluste der Ankerzähne berücksichtigen wir erst dann durch eine besondere Rechnung, wenn $B_{aA} > B_a$ ist.

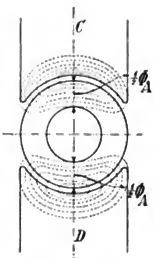


Fig. 320.

56. Abmessungen des Kommutators und der Bürsten.

Die Abmessungen des Kommutators und der Bürsten sind so zu bestimmen, daß eine passende Stromdichte und eine ausreichende Kühlfläche erhalten wird. Maschinen mit Tag- und Nachtbetrieb erfordern eine besonders reichliche Bemessung des Kommutators.

Die große Bedeutung einer guten Kühlung des Kommutators und die Wichtigkeit einer richtigen Wahl des Bürstenmaterials geht aus folgenden Versuchen hervor, die auf Veranlassung des Verfassers im E. T. I. der Hochschule Karlsruhe ausgeführt wurden.[1])

Mit Hilfe eines durch Drahtspiralen heizbaren Schleifringes wurde die Abhängigkeit der Übergangsspannung ΔP von der Temperatur der Übergangsschicht bezw. des Schleifringes und der Stromdichte festgestellt. Es ergab sich hierbei, daß verschiedene Bürstenmaterialien ein ganz wesentlich verschiedenes Verhalten zeigen. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Fig. 321 bis 326 für einige der gebräuchlichsten Bürstenmaterialien dargestellt.

Die Kurven entsprechen Werten von ΔP, die nach längerer Beobachtungszeit bei gut eingelaufenen erschütterungsfreien Bürsten sich einstellten.

Auf einem Kommutator, auf dem die Bürsten leichten Erschütterungen ausgesetzt sind, können die Werte von ΔP erheblich größer ausfallen.

Nimmt man eine Raumtemperatur von 10 bis 20° C und eine Temperaturerhöhung des Kommutators von nur 40° C an, so sind

[1]) Siehe ETZ 1907 S. 263, E. Arnold und E. Pfiffner.

Digitized by Google

die Ordinatenwerte der Kurven zwischen 50° und 60° C. maßgebend. Mit Rücksicht auf die Kommutation sind diejenigen Kohlensorten am besten, bei denen die Übergangsspannung mit der Temperatur am wenigsten fällt. Die Kurven lehren uns, daß z. B. die Marken „Le Carbone Z" und „Siemens S" gute positive Kohlen sind und „Morganite 2" eine gute negative Kohle ist.

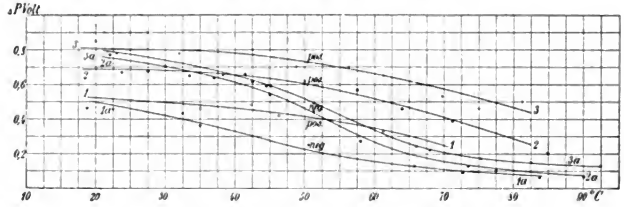


Fig. 321. Bürste: le Carbone X.
$v = 7{,}4$ m/sec. $F = 2{,}5$ cm². $g = 160$ g/cm².
1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 2,5 Amp/cm² — 2 = Positive Bürste, 2a = Negative „ } 5,0 Amp/cm²
3 = Positive Bürste, 3a = Negative „ } 10,0 Amp/cm².

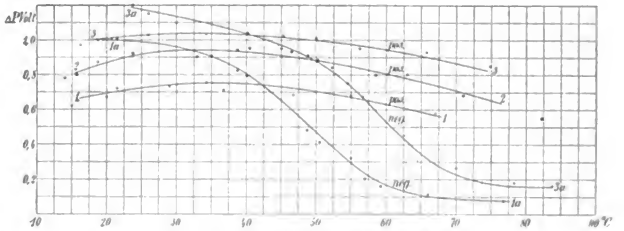


Fig. 322. Bürste: le Carbone Z.
$v = 7{,}4$ m/sec. $F = 2{,}7$ cm². $g = 160$ g/cm².
1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 2,5 Amp/cm² — 3 = Positive Bürste, 3a = Negative „ } 10,0 Amp/cm². — 2 = Positive „ 5,0 Amp/cm²

Ferner ersehen wir aus der Temperaturcharakteristik, daß wir rechnungsmäßig zu große Übergangsverluste erhalten, wenn wir den Einfluß der Temperatur nicht berücksichtigen, und daß eine gute Kühlung des Kommutators für die Kommutation von größter Wichtigkeit ist.

Digitized by Google

Um somit die am besten passende Kohlensorte, die Übergangsverluste und die zulässige Temperatur des Kommutators bestimmen

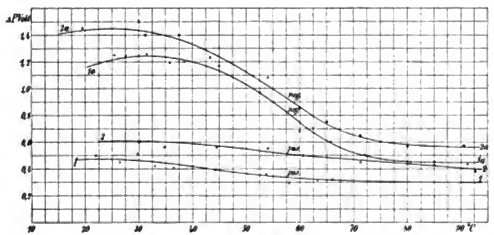


Fig. 323. Bürste: Morganite 2.
$v = 7{,}4$ m/sec. $F = 2{,}4$ cm². $g = 160$ g/cm².
1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 2,5 Amp/cm² — 2 = Positive Bürste, 2a = Negative „ } 5,0 Amp/cm².

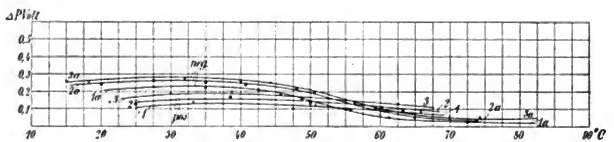


Fig. 324. Bürste: Endruweit, Metallbürste.
$v = 7{,}4$ m/sec. $F = 1{,}6$ cm². $g = 160$ g/cm².
1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 2,5 Amp/cm² — 2 = Positive Bürste, 2a = Negative „ } 5,0 Amp/cm²
3 = Positive Bürste, 3a = Negative „ } 10,0 Amp/qcm.

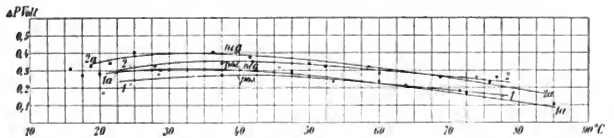


Fig. 325. Bürste: Endruweit, Kupfer-Kohlebürste.
$v = 7{,}4$ m/sec. $F = 2{,}5$ cm². $g = 160$ g/cm².
1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 2,5 Amp/cm² — 2 = Positive Bürste, 2a = Negative „ } 5,0 Amp/cm².

zu können, sollten die Temperaturcharakteristiken der Bürstenmaterialien bekannt sein.

Digitized by Google

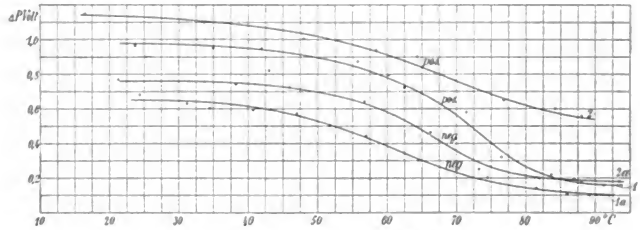


Fig. 326. Bürste: Siemens S.

1 = Positive Bürste, 1a = Negative „ } 5 Amp/cm² 2 = Positive Bürste, 2a = Negative „ } 10 Amp/cm².

Der Durchmesser des Kommutators. Er wird entweder direkt angenommen oder aus der gewählten Lamellenteilung β berechnet. Es wird

$$D_k = \frac{K\beta}{\pi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37)$$

Bezüglich Stärke und seitlicher Isolierung der Lamellen siehe Abschnitt 16 und 17, S. 47 und 48.

Die Kontaktfläche der Bürsten. Bei der Berechnung der erforderlichen Bürstenfläche geht man von der Stromdichte unter der Bürste aus. Bei schwierigen Kommutationsbedingungen wird die Stromdichte so hoch als möglich gewählt, weil ΔP mit der Stromdichte zunimmt, andererseits wird man mit Rücksicht auf die Übergangsverluste eine gewisse Grenze nicht überschreiten.

Je größer wir die Stromdichte wählen, um so kleiner wird die erforderliche Bürstenfläche und um so kleiner die Reibungsarbeit. Bei gegebenem Auflagedruck werden daher die gesamten Verluste (Übergangs- plus Reibungsverluste) bei einer gewissen Stromdichte ein Minimum erreichen, wobei die sich einstellende Kommutatortemperatur ebenfalls von Einfluß ist.

In der nachfolgenden Tabelle sind die üblichen Stromdichten s_u für verschiedene Bürstenmaterialien zusammengestellt. Die angegebenen Werte von ΔP sind Mittelwerte der positiven und negativen Bürste. Sie gelten für eine Kommutatortemperatur von etwa 60° bis 70° C, sie sind jedoch nicht für diese Temperaturen experimentell ermittelt worden und dürften daher nur annähernd richtig sein. Außerdem ist zu beachten, daß ΔP in erheblichem Maße von den Vibrationen der Bürste abhängt.

Digitized by Google

Bürstensorte	$s_{u\ norm}$	$s_{u\ max}$	ΔP bei $s_{u\ norm}$	ΔP bei $s_{u\ max}$
Kupferbürste	10—25	40 Amp/cm²	0,017—0,03	0,04 Volt
Boudreauxbürste	15—30	50 „	0,06—0,11	0,15 „
Endruweit-Metallbürste .	20—30	40 „	0,2—0,3	0,4 „
Kohlen- und Graphitbürste				
sehr weich	8—11	20 „	0,4—0,5	0,6 „
weich	6—10	15 „	0,5—0,6	0,8 „
mittelhart	5—7	11 „	0,8—1,0	1,2 „
sehr hart	4—6	9 „	1,0—1,1	1,3 „
Metall-Kohlenbürste				
Endruweit	20—30	40 „	0,4—0,5	0,6 „
Ringsdorf R III	20—30	40 „	0,5—0,7	0,8 „
Bronskol	30—45	55 „	0,1	0,1 „

Bezeichnet J_a die Stromstärke der Maschine bei maximaler Belastung, so wird die Kontaktfläche aller (der positiven und negativen) Bürsten

$$F_b = \frac{2 J_a}{s_u}.$$

Bei Wellenwicklungen mit mehr als zwei Bürstensätzen ist zu beachten, daß sich der Strom nicht ganz gleichmäßig auf alle Bürsten verteilt. Sind $2p$ Bürstensätze aufgelegt, so ist die Gefahr der Überlastung einer Bürste um so größer, je größer $\frac{p}{a}$ ist, sofern keine Äquipotentialverbindungen angebracht werden. Die Stromdichte ist daher in solchen Fällen in der Nähe der unteren Grenzen zu wählen.

Die Bürstenbreite. Die berechnete Fläche ist auf eine genügende Zahl von Bürsten zu verteilen. Die Bürstenbreite b_1 (in der Drehrichtung des Kommutators) muß sich nach der Lamellenbreite richten. Die Zahl der Lamellen, die eine Bürste bedecken darf, ist von wesentlichem Einfluß auf die Kurzschlußspannung und die effektive Reaktanzspannung. Eine endgültige Bestimmung der Bürstenbreite ist daher nicht möglich ohne Berechnung der Kommutation.

Bei Maschinen, deren Klemmenspannung größer als etwa 100 Volt ist, bedecken die Kupferbürsten gewöhnlich 1 bis $2^1/_2$ und die Kohlenbürsten 2 bis $3^1/_2$ Lamellen, bei Niederspannungsmaschinen wird die Bürstenbreite oft kleiner als die Lamellenbreite. Sollen bei mehrfachen Parallelwicklungen und Reihenparallelwicklungen mit $a > p$ die Bürsten eines Stiftes mehrere Lamellen be-

Digitized by Google

decken oder ist die Lamellenbreite groß, so können die Bürsten, wie in Fig. 131, Seite 132, Bd. I dargestellt ist, zweckmäßig gestaffelt werden.

Im übrigen richtet man sich in jeder Fabrik mit der Bürstenbreite nach gewissen Normalien, um denselben Bürstenhalter für verschiedene Maschinengrößen verwenden zu können.

Die Länge des Kommutators. Die Länge des Kommutators wird einesteils durch die Gesamtlänge aller Bürsten eines Stiftes und andernteils durch die erforderliche Abkühlfläche bestimmt.

Ist die Anzahl der Bürstenstifte p_1, so wird die Gesamtlänge der Bürsten eines Stiftes

$$= \frac{F_b}{b_1 p_1}.$$

Diese Länge ist so abzurunden, daß sie einer ganzen Zahl Bürsten entspricht und sie stellt die erforderliche nutzbare Länge des Kommutators dar.

Nun wird der Übergangsverlust (S. 668, Bd. I) aus

$$W_u = 2 J_a^2 P f_u \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

der Reibungsverlust (S. 681, Bd. I) aus

$$W_r = 9{,}81 \cdot v_k F_b g \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

und die Temperaturerhöhung des Kommutators (S. 747, Bd. I) aus

$$T_k = (70 \text{ bis } 120) \frac{W_u + W_r}{\pi D_k L_k (1 + 0{,}1 v_k)} \quad . \quad . \quad (40)$$

ermittelt, wo L_k die ganze Kommutatorlänge.

Wird der Kommutator künstlich gekühlt, so kann T_k erheblich kleiner als nach obiger Formel werden. — L_k muß so groß sein, daß $T_k \leqq 50^0$ C. Wenn nötig, sind β und D_k zu vergrößern.

Digitized by Google

Dreizehntes Kapitel.

57. Größe des Luftspaltes δ und Bohrung der Feldmagnete. — 58. Entwurf des Magnetgestelles. — 59. Vorläufige Berechnung des Wicklungsraumes der Erregerwicklung. — 60. Berechnung der Erregung. — 61. Berechnung einer Nebenschlußwicklung. — 62. Berechnung einer Hauptschlußwicklung. — 63. Berechnung einer Doppelschlußwicklung.

57. Größe des Luftspaltes δ und Bohrung der Feldmagnete.

Wir betrachten zunächst Maschinen ohne künstliche Kommutation. Eine richtige Bemessung des Luftspaltes δ ist hierbei von großer Wichtigkeit. Einige Gründe sprechen für einen kleinen, andere dagegen für einen großen Luftspalt.

Es ist ein möglichst kleiner Luftspalt anzustreben,

1. weil die für die Magnetisierung des Luftspaltes verbrauchten AW mit δ abnehmen,

2. weil die magnetische Streuung der Feldmagnete mit δ abnimmt,

3. weil bei der Anwendung von Äquipotentialverbindungen die Rückwirkung der Ausgleichströme auf das Feld mit der Abnahme von δ zunimmt.

Ein großer Luftspalt ist dagegen günstig,

1. weil der Widerstand des quermagnetischen Kreises, zu welchem zwei Luftzwischenräume δ gehören, mit δ wächst,

2. weil die magnetischen Unsymmetrien des Feldes, herrührend von einer exzentrischen Lage des Ankers, ungleichen Polschuhen, ungleichen Erregungen der einzelnen Pole usf., verhältnismäßig um so kleiner werden, je größer δ ist,

3. weil das magnetische Feld außerhalb der Polschuhe, also in der Kommutierungszone um so allmählicher abnimmt, je größer δ wird,

4. weil bei Nutenankern die Wirbelstromverluste in den Polschuhen mit δ abnehmen.

Digitized by Google

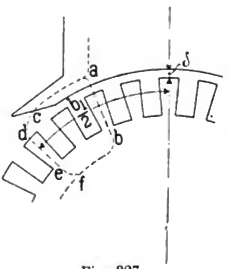


Fig. 327.

Die hier unter 1 bis 3 angeführten Gründe sprechen auch für eine hohe Zahnsättigung. Man wird daher mit hohen Zahnsättigungen und lamellierten Polen auch bei verhältnismäßig kleinem Luftspalte allen geforderten Bedingungen genügen können.

Betrachten wir die Fig. 327, so wirkt zwischen den Punkten a und f eine gewisse magnetomotorische Kraft, welche gleich den verbrauchten AW auf dem Wege $a—b—f$ oder dem Wege $a—c—d—f$ ist, also annähernd gleich

$$\frac{1}{2}(AW_p + AW_l' + AW_z')_{a-c-d-f} = \frac{1}{2}(AW_l + AW_z)_{a-b-f}.$$

Für den Fall, daß das kommutierende Feld bei Vollast gerade gleich Null wird, ist die Polspitze auf der Eintrittseite nahezu entmagnetisiert. Damit das Feld in der Kommutierungszone zwischen Leerlauf und Vollast der Maschine sich nicht zu stark ändert, können wir die Bedingung aufstellen, daß es nicht Null werden soll. Es müssen dann die magnetisierenden Windungen größer sein als die entmagnetisierenden der Polspitze, d. h. es soll

$$AW_l + AW_z > b_i \; AS. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

sein. Wir setzen

$$AW_l + AW_z > 1{,}2 \cdot b_i \; AS$$

und erhalten hieraus die Bedingung

$$\delta > \frac{1{,}2\, b_i \; AS - AW_z}{1{,}6 \cdot k_1 \, B_l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Wir sehen hieraus, daß δ um so kleiner gemacht werden kann, je größer AW_z wird. — Auf dem Wege $a—c—f$ ist die Zahnsättigung nur klein und daher annähernd

$$AW_l + AW_z = AW_l' + AW_p.$$

Es ist günstig, AW_p möglichst groß zu machen, also die Polspitze stark zu sättigen, weil dann die Übertrittcharakteristik (Fig. 279, S. 314, Bd. I) ein starkes Knie erhält, und die Quermagnetisierung einen viel geringeren Einfluß auf das kommutierende Feld ausübt, vorausgesetzt, daß bei Leerlauf die Sättigung der Polspitze erheblich hinter dem Knie liegt.

Um dem letzteren Umstande Rechnung zu tragen, und damit

Digitized by Google

die Bürstenstellung nicht zu nahe an die Polspitze heranrückt, setzen wir

$$\delta \geqq \frac{(1{,}2 \text{ bis } 2)\, b_i \; AS - AW_z}{1{,}6 \cdot k_1 \, B_l} \quad . \quad . \quad . \quad (42a)$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß man durch eine Vermehrung der Polzahl, bezw. Verkleinerung des Polbogens b_i um so eher an denjenigen Grenzwert von δ gelangt, der aus mechanischen Gründen nicht mehr unterschritten werden darf, je größer AW_z und B_l und je kleiner AS und b_i sind.

Ist z. B. $b_i = 35$ cm, $AS = 220$, $AW_z = L_z \, aw_z = 8 \cdot 400 = 3200$, $k_1 = 1{,}1$, $B_l = 8600$, so wird

$$\delta \geqq \frac{1{,}5 \cdot 35 \cdot 220 - 3200}{1{,}6 \cdot 1{,}1 \cdot 8600} = 0{,}55 \text{ cm}.$$

Bei großen Ankerdurchmessern wird man den Luftspalt nicht gern kleiner als 0,5 cm machen und sofern der Ankerdurchmesser etwa über 200 cm beträgt ihn größer wählen.

Eine Kontrolle für die richtige Wahl des Luftspaltes gibt uns auch das Verhältnis Feldamperewindungen zu Ankeramperewindungen. Dieses Verhältnis schwankt bei Nebenschlußmaschinen mit konstanter Klemmenspannung etwa zwischen 1,2 und 2,5 und man kann somit schreiben:

$$\frac{2\,AW_l}{N\,i_a} \geqq 1{,}2 \text{ bis } 2{,}5 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

Bei ganz kleinen Dynamos werden die Feldamperewindungen das 2,5fache der Ankeramperewindungen noch überschreiten, dagegen wird man bei sorgfältig berechneten großen Maschinen etwa auf das 1,2fache der Ankeramperewindungen kommen.

Bei der Wahl des Luftspaltes bei Maschinen mit künstlicher Kommutation braucht man die Bedingungen Gl. 42a und 43 nicht zu berücksichtigen. Man wird deshalb bei diesen Maschinen, um den Aufwand an Magnetkupfer möglichst klein zu machen, den Luftspalt so klein halten, als mit Rücksicht auf die zusätzlichen vom Querfeld verursachten Zahnverluste und aus mechanischen Gründen zulässig ist. Ist jedoch die Maschine für einen Betrieb mit großen, plötzlich und periodisch auftretenden Belastungsänderungen bestimmt, so ist ein großer magnetischer Widerstand für das Querfeld des Ankers anzustreben (siehe Bd. I, Abschnitt 142, S. 574).

Die Bohrung der Feldmagnete ist

$$D + 2\delta.$$

Digitized by Google

58. Entwurf des Magnetgestelles.

Wir berechnen zunächst den Kraftfluß der bei belasteter Maschine die Fläche einer Spule in der Lage des Kurzschlusses durchsetzt

$$\Phi_b = \frac{60}{p\,n}\,\frac{a}{N}\,E_a\,10^8 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

worin für Generatoren

$$E_a = P + J_a(R_a + R_h) + 2\,\Delta P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

und für Motoren

$$E_a = P - J_a(R_a + R_h) - 2\,\Delta P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

Die Werte von ΔP für verschiedene Bürstensorten sind in der Tabelle Seite 251 zusammengestellt.

Der in den Anker eintretende Kraftfluß ist

$$\Phi_a = \sigma_a\,\Phi_b$$

und der Kraftfluß eines magnetischen Stromkreises

$$\Phi_m = \sigma\sigma_a\,\Phi_b.$$

Der Koeffizient der Feldstreuung σ kann entsprechend den auf Seite 292 Bd. I gemachten Angaben angenommen und später, wenn erforderlich, durch Berechnung (s. Seite 284, Bd. I) geprüft werden. σ_a ist für Maschinen mit kleiner Bürstenverstellung gleich 1 bis 1,05 zu setzen.

Um nun aus Φ_m die Querschnitte des Magnetgestelles berechnen zu können, ist zu entscheiden, aus welcher Eisensorte es hergestellt und welche Induktion zugelassen werden soll. Oft werden mehrere Eisensorten verwendet, z. B. für die Polschuhe Eisenblech, für die Magnetkerne Stahlguß und für das Joch Gußeisen.

Die Induktion hat sich nach der Eisensorte, der Bauart und dem Verwendungszwecke der Maschine zu richten.

Bei Nebenschlußmaschinen mit konstanter Klemmenspannung ist eine hohe Sättigung des Eisens günstig, weil die äußere Charakteristik von wenig gesättigten Maschinen (s. Seite 596, Bd. I) rasch abfällt, und das Verhalten der Maschine leicht ein unstabiles wird. Die normale Erregung soll im Knie oder hinter dem Knie der Magnetisierungskurve liegen.

Passende Werte für die Amperewindungszahlen per cm Kraftlinienweg sind

$$a w_m = 30 \text{ bis } 80; \quad a w_j = 10 \text{ bis } 40.$$

Entspricht das verwendete Eisen den Magnetisierungskurven Tafel VIII, so wird annähernd

Digitized by Google

für Schmiedeeisen:

$B_m = 15500$ bis 17500 $\quad B_j = 12000$ bis 15000

für Stahlguß

$B_m = 14800$ bis 17200 $\quad B_j = 11000$ bis 14000

für Gußeisen

$B_m = 6000$ bis 8600 $\quad B_j = 5000$ bis 8000

Die kleineren Werte gelten für kleinere Maschinen, damit die prozentuale Erregerarbeit nicht zu groß wird.

Ist der Kraftfluß stark veränderlich, wie z. B. bei Maschinen, die bei konstanter Tourenzahl zeitweise zum Akkumulatorenladen ohne Zusatzmaschine benutzt werden, oder bei Motoren, deren Tourenzahl durch die Felderregung innerhalb weiter Grenzen reguliert werden soll, so wird man für die normale Felderregung geringere und für die maximale Felderregung höhere Werte von B_m und B_j erhalten. In diesem Falle geht man bei der Berechnung am besten von den maximalen zulässigen Werten der Induktionen, die den betreffenden Magnetisierungskurven entnommen werden, und dem maximalen erforderlichen Kraftfluß aus.

Bei Hauptschlußmaschinen werden die Induktionen für die maximale Stromstärke ebenso gewählt wie bei stark gesättigten Nebenschlußmaschinen.

Bei Doppelschlußmaschinen mit konstanter oder mit der Belastung steigender Klemmenspannung ist es zweckmäßig, wenn eine gute Kompoundierung erreicht und die Hauptschlußamperewindungen nicht zu groß werden sollen, etwas geringere Induktionen als oben angegeben, zu wählen. Die Charakteristik und die Berechnung der Hauptschlußwindungen (s. S. 610, Bd. I) geben am besten Aufschluß darüber, ob sie passend sind.

Wenn B_m und B_j bekannt sind, finden wir

$$Q_m = \frac{\Phi_m}{B_m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{B_j} \text{ oder } Q_j = \frac{\Phi_m}{2 B_j} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

wobei in letzterem Falle vorausgesetzt ist, daß, wie gewöhnlich, der Kraftfluß Φ_m pro Pol sich auf zwei Querschnitte Q_j verteilt.

Bei dem Entwurf des Magnetgestelles muß darauf geachtet werden, daß genügend Raum für die Erregerwicklung bleibt und die Magnetspulen eine ausreichende Abkühlungsfläche erhalten. Wird der Raum zu groß oder zu klein gewählt, so kann später,

Digitized by Google

nachdem die Magnetwicklung berechnet ist, das Gestell entsprechend geändert werden.

Bei normalen Radialpolmaschinen mit runden Polen kommt man zu guten Verhältnissen, wenn man die Höhe des Polkernes gleich dem 0,8 bis 0,9 fachen des Poldurchmessers nimmt. Auch kann die Größe des Wicklungsraumes annähernd wie folgt berechnet werden.

59. Vorläufige Berechnung des Wicklungsraumes der Erregerwicklung.

Wie wir im Abschnitt 57 Seite 225 gesehen haben, können wir schreiben

$$\frac{2\,AW_t}{N i_a} \cong 1{,}2 \text{ bis } 2{,}5$$

oder

$$\frac{2 \cdot p\,AW_k}{N i_a} \cong 1{,}2 \text{ bis } 2{,}5.$$

Aus dieser Gleichung kann, wenn die Ankerwicklung festgelegt ist, die Amperewindungszahl pro magnetischen Kreis annähernd berechnet werden.

Denken wir uns nun, die Feldwicklung bestehe aus einer einzigen Windung und s_e sei die Stromdichte, so wird der erforderliche Gesamtkupferquerschnitt der Erregung

$$Q_{ke} = \frac{AW_k}{s_e}.$$

Zerlegen wir jetzt diesen Querschnitt in mehrere Windungen, so geht ein Teil des Wicklungsraumes für die Isolation der Drähte verloren, und es wird der erforderliche Wicklungsraum pro magnetischen Kreis

$$= \frac{AW_k}{100 \cdot s_e f_e} \text{ cm}^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

Besteht die Wicklung aus Neben- und Hauptschlußwindungen mit verschiedenen Stromdichten, so kann der Wicklungsraum von beiden getrennt berechnet werden.

Der Füllfaktor f_e der Erregerspulen nimmt für zweimal besponnene Drähte folgende Werte an:

Durchmesser nackt	$d = 0{,}5$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0 mm
„ isoliert	$d_1 = 0{,}8$	1,4	2,4	3,5	4,5	5,5 „
Füllfaktor $f_e = 0{,}785 \frac{d^2}{d_1^2}$	0,30	0,40	0,55	0,58	0,62	0,65

Digitized by Google

Die Dicke der Kupferschicht soll, wenn man hierüber frei verfügen kann, was z. B. bei den offenen Radialpoltypen der Fall ist, etwa 5 bis 6 cm nicht überschreiten, weil sonst die Abkühlung der Spulen zu sehr erschwert wird. Es würde demnach in diesem Falle die Höhe des Wicklungsraumes einer Spule, wenn ein magnetischer Kreis zwei Spulen umschlingt

$$h_w \cong \frac{A W_k}{1000 \text{ bis } 1200\, s_e f_e} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

Um die Höhe h_m des Magnetkernes zu finden, ist noch die doppelte Dicke der Spulenkasten zu h_w zu addieren. Wir können nun die Skizze der magnetischen Anordnung der Maschine entwerfen und den mittleren Kraftlinienweg einzeichnen.

60. Berechnung der Erregung.

Zu einer vollständigen Berechnung der Maschine gehört die Berechnung der Leerlaufcharakteristik und der äußeren Charakteristik, besonders wenn über die Größe der Spannungsabfälle oder die Grenzen der Regulierfähigkeit der Maschine bestimmte Garantien zu geben sind. In den meisten Fällen beschränkt man jedoch die Rechnung auf die Ermittelung der Feldamperewindungen, welche erforderlich sind:

1. Bei Leerlauf und normaler Klemmenspannung und Tourenzahl. Wir bezeichnen diese Amperewindungszahl pro magnetischen Kreis mit

$$A W_{k0}.$$

Die Berechnung von $A W_{k0}$ ist bei Hauptschlußmaschinen nicht erforderlich.

2. Bei normaler Belastung, Klemmenspannung und Tourenzahl. Wir bezeichnen diese Amperewindungen mit

$$A W_k.$$

3. Bei Betriebsverhältnissen, die von den normalen abweichen, sofern solche gefordert sind, wie z. B. bei Nebenschlußgeneratoren, die bei konstanter Tourenzahl mit wesentlich verschiedenen Klemmenspannungen arbeiten sollen, oder bei Motoren mit regulierbarer Tourenzahl usf.

Digitized by Google

61. Berechnung einer Nebenschlußwicklung.

Bezeichnet i_n die Stromstärke, q_n den Querschnitt in mm², l_n die mittlere Länge einer Nebenschlußwindung in cm, ferner w_n die Anzahl aller Nebenschlußwindungen, R_n deren Widerstand und AW_t die gesamte Amperewindungszahl (deren Berechnung siehe Bd. I, S. 260 und 327), so ist bei Leerlauf

$$AW_{to} = p\,AW_{ko} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

und bei Vollast

$$AW_t = p\,AW_k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

wenn eine Erregerwindung wie bei der gewöhnlichen Radialpoltype den ganzen Kraftfluß Φ_m umschlingt. Umspannt dagegen eine Erregerwindung nur den Kraftfluß $\frac{1}{2}\,\Phi_m$, wie bei der Manchestertype, so wird

$$AW_{to} = 2 \cdot p\,AW_{ko} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51a)$$

und

$$AW_t = 2 \cdot p\,AW_k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52a)$$

Ferner erhalten wir

$$R_n = \frac{w_n\, l_n (1 + 0{,}004\, T_m)}{5700 \cdot q_n}\ \text{Ohm} \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

wenn T_m die mittlere Temperaturerhöhung des Magnetkupfers über ca. 15 ° C bedeutet und l_n zunächst aus der entworfenen Skizze des Magnetgestelles ermittelt wird.

Der maximale Erregerstrom bei der Klemmenspannung P wird

$$i_{n\,max} = \frac{P}{R_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (54)$$

Aus den Gl. 53 und 54 folgt

$$i_{n\,max}\, w_n = \frac{5700 \cdot P q_n}{(1 + 0{,}004\, T_m)\, l_n} = AW_{t\,max} \quad . \quad . \quad (55)$$

Die maximale Amperewindungszahl einer Nebenschlußwicklung ist somit unabhängig von der Windungszahl, wenn die Klemmenspannung P und die mittlere Windungslänge l_n gegeben sind, und nur abhängig vom Querschnitt q_n.

Wenn daher die Erregung einer Nebenschlußmaschine z. B. wegen magnetisch schlechten Materials zu klein ausgefallen ist, so hat es keinen Zweck, die Windungszahl zu erhöhen. AW_t kann nur durch Vergrößerung des Querschnittes q_n oder allenfalls durch Parallelschaltung der Feldspulen vergrößert werden.

Digitized by Google

Um den erforderlichen Kraftfluß Φ_m noch mit Sicherheit etwas überschreiten zu können, setzen wir

$$q_n = \frac{A\, W_t\, l_n\, (1 + 0{,}004\, T_m)}{5700 \cdot P} \text{ (1,1 bis 1,2)} \quad . \quad . \quad (56)$$

Für runden Draht wird der Durchmesser

$$d_n = \sqrt{\frac{4}{\pi} q_n}.$$

Der sich ergebende Wert ist nach oben auf einen gebräuchlichen Durchmesser abzurunden.

Zeigt der Querschnitt des auf den gebräuchlichen Durchmesser abgerundeten Drahtes eine zu große Abweichnng gegenüber dem gerechneten Querschnitt, so kann man auch zwei Drahtdurchmesser anwenden. Nimmt man w_{n1} Windungen vom Querschnitt q_{n1} und w_{n2} Windungen vom Querschnitt q_{n2}, so muß

$$q_n = \frac{q_{n1}\, w_{n1} + q_{n2}\, w_{n2}}{w_{n1} + w_{n2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (57)$$

sein.

Wie im Abschnitt 49 Seite 226 ermittelt wurde, kann man das Gewicht des Magnetkupfers gleich:

$$G_{km} = \frac{A\, W_t\, l_n \cdot 8{,}9}{10^5 \cdot s_n}$$

setzen. Als Wattverlust in der Erregerwicklung erhält man

$$W_n = \frac{(1 + 0{,}004\, T_m)\, A\, W_t\, l_n\, s_n}{5700} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (58)$$

Aus den obigen Gleichungen ist ersichtlich, daß für eine gegebene Amperewindungszahl und mittlere Windungslänge das Kupfergewicht und der Wattverlust nur von der Stromdichte abhängig sind; das Gewicht ist umgekehrt und der Wattverlust direkt proportional derselben.

Da nun der Wattverlust im Nebenschluß, namentlich bei großen Maschinen wegen seines geringen Betrages keine Rolle spielt, wird man, um kleines Kupfergewicht zu erhalten, die Stromdichte möglichst groß wählen, und zwar so groß, als es die Erwärmung der Spulen zuläßt.

Die Erwärmung der Magnetspulen wurde eingehend in Band I, Abschnitt 174, erörtert.

Für die durch Widerstandsmessung bestimmte mittlere Temperaturerhöhung kann die Formel

Digitized by Google

$$T_m = \frac{C_m}{a_m} \text{ Grad C}$$

benutzt werden. Es ist C_m eine Erfahrungszahl und a_m die spezifische Abkühlungsfläche.

$$a_m = \frac{\text{Abkühlungsfläche in cm}^2}{\text{Wattverlust}} = \frac{A_m}{W_h + W_n}.$$

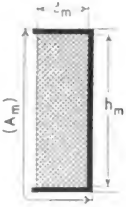


Fig. 328.

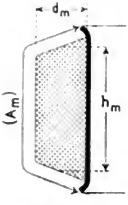


Fig. 329.

A_m ist die Abkühlungsfläche aller Spulen. Wenn die Magnetspulen lang sind, so wird die Abkühlungsfläche A_m nach Fig. 328 berechnet, indem nur eine Endfläche der Spule als kühlend angesehen wird. Sind die Spulen dagegen kurz und dick, so wird A_m nach Fig. 329 berechnet.[1])

Den Koeffizient C_m kann man setzen:

für ganz offene Maschinen . . . . $C_m = 450—500$,
für Maschinen mit Lagerschildern . . $C_m = 550—650$,
für halbgeschlossene Maschinen . . $C_m = 700—750$,

für ganz geschlossene Maschinen kann C_m bis zu 1300 und darüber steigen.

Die Stromdichte bewegt sich etwa zwischen den Grenzen

$$s_n = 1{,}2 \text{ bis } 2{,}2 \text{ Ampere}$$

und beträgt meistens

1,4 bis 1,7 Ampere.

Bei gut ventilierten Spulen kann man s_n noch größer als 2,2 wählen.

Am zweckmäßigsten wählt man zunächst s_n und findet dann

$$i_n = q_n s_n$$

$$w_n = \frac{A W_t}{i_n}$$

[1]) Nach Angaben des Herrn Ingenieur H. Schlichting erhält man gute Resultate, indem man bei kleineren Maschinen $a_m = 20—22$ cm² und bei größeren, gut ventilierten Maschinen $a_m = 18—20$ cm² setzt und für die Berechnung von a_m die totale Abkühlungsfläche der Spulen einführt. Diese Abkühlungsfläche ist für eine Spule gleich dem Produkte aus Umfang des Querschnittes einer Spule und mittlerer Windungslänge.

Digitized by Google

$$i_{n\,max} = \frac{AW_{t\,max}}{w_n}$$

$$s_{n\,max} = \frac{i_{n\,max}}{q_n}$$

Wir können nun den Wicklungsraum nach Größe und Gestalt, die mittlere Windungslänge l_n, sowie den Widerstand R_n genauer berechnen.

Für die normale Belastung bezw. den normalen Nebenschlußstrom i_n wird der gesamte Widerstand des Nebenschlußstromkreises

$$R_n + r_{nb} = \frac{P}{i_n}$$

oder

$$r_{nb} = \frac{P}{i_n} - R_n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

wenn r_{nb} den bei normaler Belastung vorzuschaltenden Widerstand im Nebenschluß bedeutet.

Bei Leerlauf wird die Stromstärke im Nebenschluß

$$i_{no} = \frac{AW_{to}}{w_n}$$

und der erforderliche Vorschaltwiderstand bei nicht erwärmter Maschine

$$r_{no} = \frac{P}{i_{no}} - R_n = \frac{P}{i_{no}} - \frac{l_n w_n}{5700 \cdot q_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

Um den Einfluß von Änderungen der Umdrehungszahl auf die Klemmenspannung ausgleichen zu können, macht man den Vorschalt und Regulierwiderstand

$$r_n = 1{,}1 \text{ bis } 1{,}5 \left(\frac{P}{i_{no}} - \frac{l_n w_n}{5700 \cdot q_n} \right) \quad . \quad . \quad . \quad (61)$$

Die Abstufung des Regulierwiderstandes ist in Kapitel 19 behandelt.

62. Berechnung einer Hauptschlußwicklung.

Bezeichnet w_h die gesamte Zahl der Hauptschlußwindungen und J_h die Stromstärke, so muß (Berechn. von AW_t siehe Bd. I, S. 327)

$$w_h = \frac{AW_t}{J_h} \text{ sein}$$

und

$$q_h = \frac{J_h}{s_h} \text{ mm}^2. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Digitized by Google

Die Stromdichte s_h kann aus der Gleichung

$$s_h = \frac{5700 \cdot W_h}{(1 + 0{,}004\, T_m) J_h w_h l_h} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

berechnet werden, wenn der Wattverlust W_h der Hauptschlußwindungen und die mittlere Länge l_h einer Windung bekannt sind.

Mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad wird bei den Hauptschlußgeneratoren meistens

$$s_h = 1 \text{ bis } 1{,}7 \text{ Amp/mm}^2$$

gewählt; bei Motoren mit kurzzeitigem Betrieb und Bahnmotoren steigt es bis auf

$$s_h = 2 \text{ bis } 3 \text{ Amp/mm}^2.$$

Die Magnetspulen können entweder in Serie oder gruppenweise parallel geschaltet werden. Im allgemeinen ist einer Serieschaltung der Vorzug zu geben, weil ungleiche Erwärmungen oder ungleiche Wicklungslängen bei der gruppenweisen Parallelschaltung zu magnetischen Unsymmetrien Veranlassung geben.

63. Berechnung einer Doppelschlußwicklung.

Soll die Klemmenspannung konstant bleiben, so ist die Zahl der Nebenschlußamperewindungen bei allen Belastungen gleich denjenigen bei Leerlauf, also

$$i_n w_n = AW_{to}$$

und die Hauptschlußamperewindungen bei Vollast sind

$$i_h w_h = AW_t - AW_{to}.$$

Wir erhalten somit

$$q_n = \frac{(1 + 0{,}004\, T_m) l_n AW_{to}}{5700 \cdot P} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

$$i_n = \frac{q_n}{s_n},$$

$$w_n = \frac{AW_{to}}{i_n},$$

$$w_h = \frac{AW_t - AW_{to}}{J_h},$$

$$q_h = \frac{J_h}{s_h} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

Digitized by Google

Wird Überkompoundierung, d. h. eine mit der Belastung steigende Klemmenspannung verlangt, so bleibt $i_n w_n$ nicht konstant. In diesem Falle berechnen wir zunächst, wie oben angegeben, aus

$$i_n w_n = AW_{to}$$

die Nebenschlußwicklung für Leerlauf und den Widerstand

$$R_n = \frac{(1 + 0{,}004 \cdot T_m) l_n}{5700 \cdot q_n}.$$

Es ist dann für eine beliebige höhere Klemmenspannung P die Zahl der Nebenschlußamperewindungen

$$AW_n = \frac{P}{R_n} w_n.$$

Berechnen wir jetzt noch die Gesamtamperewindungszahl $AW_{t\,max}$ für die maximale Klemmenspannung der vollbelasteten Maschine, so muß

$$w_h = \frac{AW_{t\,max} - AW_n}{J_h}$$

sein.

Fällt die Tourenzahl der Maschine mit der Belastung um einen gewissen Betrag, so wird $AW_{t\,max}$ für einen Kraftfluß berechnet, der dem P_{max} oder dem P_{konst} bei der kleineren Tourenzahl entspricht.

Für die Stromdichten gilt das früher Gesagte.

Will man die Kompoundierung für verschiedene Belastungen prüfen, so ist das auf Seite 610, Bd. I, beschriebene graphische Verfahren zu empfehlen.

Da die Größe der Ankerrückwirkung nicht genau berechnet werden kann und die magnetischen Eigenschaften des Eisens, von dessen Sättigung die Kompoundierung ebenfalls abhängt, meistens nicht genau bekannt sind, ist es auch nicht möglich, die Kompoundierung genau vorauszuberechnen, und man ist auf den Versuch mit der ausgeführten Maschine angewiesen, wenn die Kompoundierung eingehalten werden soll.

Bei Maschinen mit kleinen Querschnitten der Hauptschlußwicklung können nachträglich Windungen ab- oder einige Windungen zugewickelt werden, bei großen Querschnitten ist es jedoch bequemer eine Nebenschließung zur Hauptschlußwicklung anzuwenden, wie in Fig. 200, Seite 244, Bd. I, angegeben wurde; man hat

Digitized by Google

dann die Möglichkeit, die Kompoundierung auch während des Betriebes zu ändern.

Da ferner die Kompoundierung auf konstante Klemmenspannung eine bestimmte Tourenzahl voraussetzt, die im Betriebe vielfach nicht eingehalten wird, und weil sich der Widerstand der Nebenschlußwicklung infolge der Erwärmung der Maschine ändert, wird häufig auch in den Nebenschlußstromkreis ein Regulierwiderstand eingeschaltet.

In diesem Falle ist q_n entsprechend den zu erwartenden Betriebsverhältnissen etwas größer zu machen, als sich nach Gl. 64 ergibt.

Digitized by Google

Vierzehntes Kapitel.

64. Die vom Ankerfeld in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK. — 65. Berechnung des Wendefeldes und der Wendepole. — 66. Form und Stärke des Wendefeldes. — 67. Die Stabilität des Wendefeldes. — 68. Nachrechnung der Maschine bezüglich Kommutierung. — 69. Einige experimentell ermittelte Kommutationskurven. — 70. Berechnung der Polschuhform und der Feldkurven.

64. Die vom Ankerfeld in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK.

a) Glatter Anker. Wir betrachten zunächst eine Maschine mit einem glatten Anker und wählen eine Anordnung mit zwei Spulenseiten übereinander, die gleichzeitig in den Kurzschluß treten. Die Bürstenbreite nehmen wir gleich einer Lamellenteilung.

In Fig. 330 ist für diesen Fall die MMK der Ankeramperewindungen in Abhängigkeit vom Ankerumfange aufgetragen. Fig. 330a stellt den Moment gerade vor dem Beginn des Kurzschlusses des Spulenpaares 6—6 dar. Da in diesem Moment keine Spule im Kurzschluß ist, ist der Maximalwert der MMK-Kurve gleich $\tau\, AS$. Es ist hier angenommen, daß das Stromvolumen eines Spulenseitenpaares in einem Punkt konzentriert ist. Die MMKe erzeugen ein Ankerquerfeld von der in Fig. 331 angegebenen Gestalt (siehe Bd. I, S. 301).

Betrachten wir den Moment, in welchem die Spulen 6—6 (Fig. 330) in den Kurzschluß treten, und nehmen wir an, daß die Spulen dann die in Fig. 331 eingezeichnete Lage A im Felde haben, so werden die Spulen von einem Kraftfluß gleich der vertikal schraffierten Fläche (die Fläche unterhalb der Achse ist negativ zu nehmen) durchsetzt. Ist das Spulenpaar im Kurzschluß, so ändert sich die Form der MMK-Kurve. Für $t = 0$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ und $\frac{1}{1}\,T$ ist die Form der MMK-Kurve (e) unter Annahme, daß der Kurzschlußstrom geradlinig verlaufe, in Fig. 330a—e aufgezeichnet. Es läßt sich die Änderung der Form dieser Kurve leicht ermitteln, indem wir die MMK-Kurve der kurzgeschlossenen Spulen und die MMK-Kurve der

Digitized by Google

übrigen Spulen für sich betrachten. Beide sind in Fig. 330 punktiert eingetragen und mit a und b bezeichnet. Die Summe der Ordinaten der Kurven a und b ergibt somit die ausgezogene resultierende MMK-Kurve c. Die MMK-Kurve a ändert die Größe ihrer Ordinate je nach der Phase des Kurzschlusses. Am Anfang und Ende des Kurzschlusses ist die Ordinate $\beta_D AS$, jedoch die Richtung verschieden. Für $t = \frac{1}{2}T$ ist die MMK der kurzgeschlossenen Spulen gleich Null. Die MMK-Kurve b der nicht kurzgeschlossenen Spulen verschiebt sich im Raume mit den kurzgeschlossenen Spulen. Befände sich der Anker in der Luft oder stünde ihm rings herum lamelliertes Eisen gegenüber, so ist es ersichtlich, daß das von der MMK-Kurve b erzeugte Querfeld überhaupt keine EMK erzeugen würde. Bei Maschinen mit ausgeprägten Polen ist der Vorgang schwieriger zu verfolgen, da sich bei der Drehung auch die magnetische Leitfähigkeit des Ankerquerfeldes ändert und es dadurch doch möglich ist, daß durch die Bewegung der Kurve b eine Änderung des Kraftflusses durch die kurzgeschlossene Spule erzeugt wird.

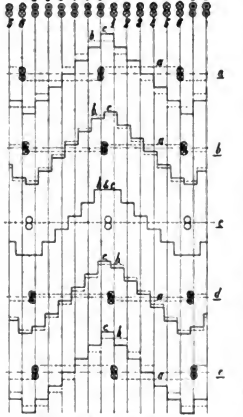


Fig. 330a bis 330e.

Fig. 331.

Betrachten wir jedoch die resultierende MMK-Kurve für die Zeit $t = T$ (Fig. 330e), so sieht man, daß sie räumlich genau die gleiche Gestalt aufweist wie die MMK-Kurve für die Zeit $t = 0$ (Fig. 330a). Die Feldverteilung wird somit am Anfang und am Ende des Kurzschlusses genau die gleiche sein. Die Spulen 6—6 haben sich jedoch um die Strecke β_D verschoben. In Fig. 331 sind sie von der Lage A in die Lage B gekommen. Der Kraftfluß, welcher die Spulen in der Lage B durchsetzt, ist in Figur 331 hori-

Digitized by Google

zontal schraffiert. Die Änderung Φ_q des die betrachtete Spule durchsetzenden Ankerquerfeldes während des Kurzschlusses ist somit gleich der Summe der einfach schraffierten Flächen. Ist die Spulenweite unverkürzt, so sind die beiden Flächen gleich. Die mittlere durch diese Änderung des Ankerquerfeldes in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK wird somit

$$e = w \frac{2\Phi_q}{T} \cdot 10^{-8}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (66)$$

Man kann sich diese EMK auch erzeugt denken, indem man annimmt, daß die Spule sich in dem Felde $B_q = \frac{\Phi_q}{b_D l_i}$ mit der Geschwindigkeit $v = \frac{b_D}{100\,T}$ bewege. Die EMK e fällt somit mit unserer EMK e_q zusammen, denn es ist

$$e_q = 2\,w\,l_i\,B_q v \cdot 10^{-6} = e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (67)$$

Bei glatten Ankern wird ferner noch durch die Änderung des Ankerstreufeldes in der kurzgeschlossenen Spule eine EMK e_r induziert. Das Streufeld einer Spule besteht aus demjenigen Kraftfluß, der in Fig. 330 nur zwei der übereinander liegenden Leiter und die Spulenköpfe der betrachteten Spule umschlingt, ohne mit anderen Spulen verkettet zu sein. Man nennt e_r die Reaktanzspannung oder die Spannung der Streureaktanz, deren Mittelwert bezeichnen wir mit e_{rs}.

Bezeichnet e_0 die EMK, die bei konstanter Felderregung und stromlosem Anker vom Hauptfelde B_0 in der kurzgeschlossenen Spule induziert würde, so erhalten wir für reine Widerstandskommutation die Bedingung

$$e_0 - e_q = e_r.$$

Die resultierende Feldstärke in der Kommutierungszone oder die Stärke des Wendefeldes ist $B_0 - B_q$ und bei Erfüllung obiger Bedingung klein, weil e_r klein ist.[1])

Bedeckt die Bürste mehrere Lamellen, und zwar zunächst eine ganze Zahl, so zeigt am Anfang und Ende des Kurzschlusses einer Spule die MMK-Kurve die gleiche räumliche Gestalt. Wir brauchen dann nur die Größe des Kraftflusses über der Kommutierungszone b_D im Moment des Eintretens einer Spule zu ermitteln, um hieraus sofort die mittlere durch das Ankerquerfeld induzierte EMK zu erhalten.

Die maximale MMK der nicht kurzgeschlossenen Spulen ergibt sich zu $(\tau - b_D + \beta_D) AS$ und ist über die ganze Kommutierungs-

[1]) Siehe auch Bemerkung im Nachtrag.

Digitized by Google

zone konstant. Nehmen wir somit an, daß die MMKe der sich im Kurzschluß befindlichen Spulen einander kompensieren, so würde

$$e_q = 2\frac{N}{K} l_i v A S \lambda_q \left(\frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau}\right) 10^{-6} \quad . \quad . \quad (68)$$

sein.

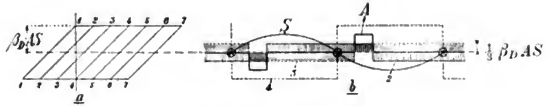


Fig. 332a und 332b.

Wir wollen jetzt noch den Einfluß der gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen auf das Ankerquerfeld untersuchen. Wir betrachten den in Fig. 332 dargestellten Fall, in welchem die Bürste genau drei Lamellenteilungen breit ist. Im Moment, in welchem das Spulenpaar 4—4 in den Kurzschluß tritt, sind die Spulen 2—2 und 3—3 im Kurzschluß (Fig. 332a). Die MMK-Kurve der Spulen 3—3 ist in Fig. 332b horizontal schraffiert, während die MMK-Kurve der Spulen 2—2 vertikal schraffiert ist. Bilden wir aus beiden die resultierende MMK-Kurve, so sehen

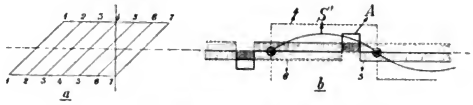


Fig. 333a und 333b.

wir, daß die MMKe einander größtenteils kompensieren. Die dick ausgezogene Kurve A stellt die resultierende MMK-Kurve dar. Nur in der Kurzschlußzone tritt eine MMK auf, und zwar über der Länge β_D. Die Größe dieser MMK ist gleich $\frac{2}{3}\beta_D AS$. Verläßt die Spule 4—4 den Kurzschluß (Fig. 333a), so ist die Spule aus ihrer Lage S in die Lage S' gekommen. Das Bild der resultierenden MMK-Kurve für die kurzgeschlossenen Spulenpaare 5—5 und 6—6 ist dasselbe wie im Anfang des Kurzschlusses für die Spulenpaare 2—2 und 3—3 (Kurve A). Die MMK gleich $\frac{2}{3}\beta_D AS$ ruft in der neutralen Zone eine Induktion $\frac{2}{3}\frac{\beta_D}{\tau} 2\lambda_q AS$ hervor. Bewegt sich die Spule 1—1 von der Lage S in die Lage S', so ist die Änderung des Kraftflusses

Digitized by Google

$$\Delta\Phi = 2 \cdot b_D \frac{2}{3} \frac{\beta_D}{\tau} 2 \lambda_q A S \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (69)$$

und diese Änderung ruft eine mittlere EMK

$$e = w \frac{\Delta\Phi}{T} 10^{-8} = 2 \frac{N}{K} l_i v A S \lambda_q \frac{0{,}22 \beta_D}{\tau} 10^{-6} \quad . \quad . \quad (70)$$

hervor. Die mittlere vom Ankerquerfeld induzierte EMK wird somit in diesem Fall:

$$e_q = 2 \cdot \frac{N}{K} l_i v A S \lambda_q \left(\frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau} + \frac{0{,}22 \beta_D}{\tau} \right) 10^{-6} \quad . \quad (71)$$

Für verschiedene Verhältnise ergeben sich für das Klammerglied folgende Werte:

für $b_1 = \beta$: $\quad \frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau}$

für $b_1 = 2\beta$: $\quad \frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau}$

für $b_1 = 3\beta$: $\quad \frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau} + \frac{0{,}22 \beta_D}{\tau}$

für $b_1 = 4\beta$: $\quad \frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau} + \frac{0{,}5 \beta_D}{\tau}$.

Die Momentanwerte der durch das Ankerquerfeld induzierten EMK sind für den Fall, daß die Bürste genau gleich einer ganzen Anzahl Lamellen ist, leicht zu ermitteln. In Fig. 332b stellt Kurve *A* die MMK-Kurve der kurzgeschlossenen Spulen für den Moment, in welchem die Spulen 4—4 in den Kurzschluß treten, dar. Diese MMK-Kurve weist jedesmal die gleiche räumliche Lage und Gestalt auf, wenn sich der Anker um eine Strecke β_D gedreht hat; somit in den Zeitmomenten $t = 0$, $t = \frac{1}{3} T$, $t = \frac{2}{3} T$ und $t = T$. Teilen wir die Kurzschlußzone, die zwischen den Endlagen *S* und *S'* der Spulen sich erstreckt, in drei Strecken von der Breite β_D ein, so ist, wie ein Blick in Fig. 332b und 333b lehrt, die totale MMK über der ersten und letzten Strecke β_D der Kurzschlußzone gleich $(\tau - b_D + \beta_D) AS$ und über der mittleren Strecke β_D gleich $(\tau - b_D + \beta_D + \frac{2}{3} \beta_D) AS$. Zwischen den Zeitmomenten $t = 0$ und $\frac{1}{3} T$; $t = \frac{1}{3} T$ und $\frac{2}{3} T$ und $t = \frac{2}{3} T$ und T ist die Änderung des Kraftflusses durch die Spule 4—4 somit bezw. $\left(\frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau} \right) AS \cdot 2 \lambda_q \cdot \beta_D$, $\left(\frac{\tau - b_D + \beta_D + \frac{2}{3} \beta_D}{\tau} \right) AS \cdot 2 \lambda_q \beta_D$ und $\left(\frac{\tau - b_D + \beta_D}{\tau} \right) AS \cdot 2 \lambda_q \cdot \beta_D$. Die Mittelwerte der zwischen den genannten Zeitmomenten induzierten EMKe verhalten sich somit wie

$$(\tau - b_D + \beta_D) : (\tau - b_D + \beta_D + \tfrac{2}{3} \beta_D) : (\tau - b_D + \beta_D).$$

Digitized by Google

Innerhalb einer β_D breiten Strecke der Kurzschlußzone sind immer drei Spulenpaare im Kurzschluß (Fig. 332a). Verläuft der Kurzschlußstrom geradlinig, so schicken diese Spulenpaare durch die Spule 4—4 einen Kraftfluß, dessen Änderungsgeschwindigkeit konstant ist. Die Momentanwerte der von den kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMKe sind somit bei geradlinigem Kurzschlußstrom über der Strecke β_D konstant. Sie fallen mit den gerechneten Mittelwerten zusammen, da das Feld der nicht kurzgeschlossenen Spulen sich mit dem Anker über die Strecke β_D mitbewegt und in dieser Zeit keine EMK induziert.

Die Mittelwerte der induzierten EMKe sind für die β_D breiten Strecken der Kurzschlußzone nur wenig verschieden. Da weiter $\tau - b_D + \beta_D$ wenig von τ abweicht, dürfen wir sagen: bei geradlinigem Verlauf des Kurzschlußstromes ist der Momentanwert der vom Ankerquerfeld induzierten EMK gleich:

$$e_q = 2\frac{N}{K} \cdot l_i \cdot v\, A S \lambda_q\, 10^{-6}\ \text{Volt}. \quad . \quad . \quad . \quad (72)$$

und konstant, so lange λ_q konstant ist.

Ist die Bürstenbreite nicht genau gleich einer ganzen Zahl Lamellen, so läßt sich der Vorgang ebenfalls verfolgen, jedoch ist dann zu beachten, daß die MMK-Kurven am Anfang und Ende des Kurzschlusses verschieden sind. Das Klammerglied in Gl. 71 weicht jedoch auch in diesem Falle nicht erheblich von 1 ab, so daß die Gl. 72 mit genügender Annäherung allgemein gültig ist.

Die Momentanwerte der vom Ankerfeld induzierten EMK finden jedoch nur so lange ihren Ausdruck in $e_q + e_r$, als der Kurzschlußstrom geradlinig verläuft. Treten zusätzliche Ströme auf, so kommt für diese bei ihrer Rückwirkung auf die kurzgeschlossene Spule die volle Selbstinduktion, sowie die gegenseitige Induktion der gleichzeitig im Kurzschluß befindlichen Spulenseiten in Betracht. Hierdurch ändern sich die momentanen EMKe; der Mittelwert wird jedoch von den zusätzlichen Strömen nur durch gegenseitige Induktion und daher unwesentlich beeinflußt.

b) Nutenanker. Bei Nutenankern können wir die gleichen Überlegungen anstellen, jedoch ist hier statt mit dem Stromvolumen zweier übereinander liegender Spulenseiten mit dem Stromvolumen einer Nut $t_1 AS$ zu rechnen, denn erst nach einer Verschiebung des Ankers um eine ganze Zahnteilung hat der magnetische Widerstand des Ankerfeldes wieder denselben Wert. Es wird jetzt e_q die mittlere EMK für das ganze Stromvolumen einer Nut. Für die Reaktanzspannung kommt hier die Streuung der Stirnverbin-

Digitized by Google

dungen und die Streuung durch die Nut und über einen Teil des Zahnkopfes in Betracht.

Die Leitfähigkeit der Nutenstreuung ist wie früher gerechnet

$$\lambda_n = 1{,}25\left[\frac{r}{3\,r_3}+\frac{r_5}{r_3}+\frac{r_7}{r_8}+\frac{2\,r_6}{r_1+r_8}+\frac{r_4}{r_1}\right] \quad . \quad . \quad (73)$$

Die Leitfähigkeit der Spulenkopfstreuung ist

$$\lambda_s = 0{,}46\cdot\log_{10}\left(\frac{2\,l_s}{U_s}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (74)$$

wo U_s den Umfang des Spulenkopfes bedeutet.

Weiter verläuft noch ein kleiner Streufluß zwischen den Nutenkanten, wie in Fig. 334 angegeben. Die Leitfähigkeit dieses Streuflusses können wir etwa gleich setzen:

$$\lambda_{ks} = 0{,}92\log_{10}\frac{\pi\,t_1}{2\,r_1} \quad . \quad . \quad (75)$$

Es wird dann

$$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\lambda_s\frac{l_s}{l_i} \quad . \quad (76)$$

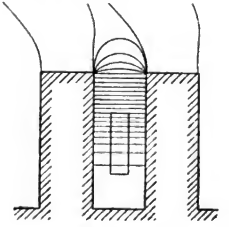


Fig. 334.

Sei Φ_s das Streufeld einer Nut pro 1 cm Ankerlänge, so ist

$$\Phi_s = t_1\,A\,S\,\lambda_{Ns} \quad . \quad . \quad (77)$$

Dieser Kraftfluß ändert sich während der Zeit T_N von $-\Phi_s$ auf $+\Phi_s$.

Die mittlere durch das Streufeld in den $\frac{N}{K}$ Leitern einer Spule induzierte EMK ist somit gleich

$$e_{rs} = \frac{2\,\Phi_s}{T_N}\,\frac{N}{K}\,l_i\cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (78)$$

Nach Einsetzen der Werte von Φ_s (Gl. 77) und T_N (S. 363, Bd. I) ergibt sich der Mittelwert der Reaktanzspannung einer Spule

$$e_{rs} = 2\left(\frac{N}{K}\,l_i\,v\,AS\right)\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1+b_D-\left(\frac{a}{p}-\varepsilon\right)\beta_D}\,10^{-6} \quad . \quad . \quad (79)$$

Durch das Ankerquerfeld und das Streufeld der kurzgeschlossenen Spule wird somit in einer Spule eine EMK induziert, deren über die Kurzschlußzeit T_N gerechneter Mittelwert gleich $e_q + e_{rs}$ ist. Es muß nochmals ausdrücklich betont werden, daß dieser Mittelwert sich auf die Kurzschlußzeit der Nut bezieht.

Für die Funkenbildung ist nicht der Mittelwert der

Digitized by Google

Reaktanzspannung, sondern der Maximalwert maßgebend. Obwohl wir späterhin immer mit dem Mittelwert rechnen, weil die Rechnung sehr einfach wird, so ist es doch in vielen Fällen, besonders wenn vier und mehr Spulenseiten in einer Nut liegen und außerdem die Bedingungen für die Kommutation ungünstige sind, notwendig, den Maximalwert der Reaktanzspannung zu ermitteln. Wir können diese Spannung jedoch nur berechnen, wenn wir den zeitlichen Verlauf des Kurzschlußstromes kennen, wir wollen daher unseren Rechnungen die Voraussetzung zugrunde legen, der Kurzschlußstrom verlaufe geradlinig.

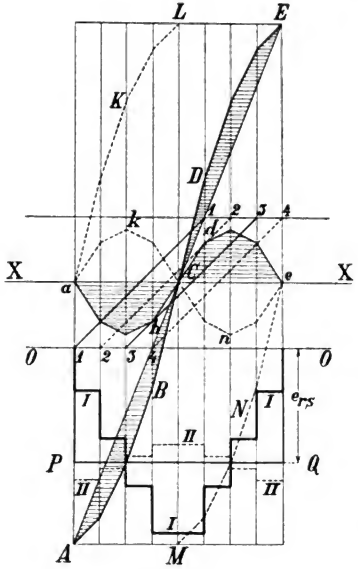


Fig. 335.

Unter dieser Voraussetzung ändert das ganze Stromvolumen einer Nut sich nur dann geradlinig, wenn die übereinanderliegenden Spulenseiten gleichzeitig in den Kurzschluß treten und außerdem entweder nur zwei Spulenseiten in einer Nut liegen oder, sofern mehr als zwei Spulenseiten in einer Nut liegen, die Bürsten nicht mehr als eine Lamelle bedecken. In allen anderen Fällen verläuft das Kurzschlußstromvolumen einer Nut nicht geradlinig und es wird die Reaktanzspannung einen Maximalwert aufweisen. Den Maximalwert und die Momentanwerte der in einer kurzgeschlossenen Spule induzierten EMK können wir finden, indem wir die zeitliche Änderung des Stromvolumens einer Nut betrachten.

In Fig. 335 ist der Fall aufgezeichnet, in welchem in einer Nut vier Spulenseiten liegen, die in gleichen Zeitabschnitten nacheinander in den Kurzschluß treten. Die Bürste ist 2,5 Lamellen breit, denn eine Kurzschlußstromkurve (1—1, 2—2) erstreckt sich

Digitized by Google

über 5 Felder, von denen jedes einer halben Lamellenteilung entspricht. Der Verlauf der Kurzschlußströme in den verschiedenen Spulenseiten wird in Abhängigkeit von der Kurzschlußzeit durch die Geraden 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 angegeben, wobei 1—1 und 3—3 den durch die positive und 2—2, 4—4 den durch die negative Bürste kurzgeschlossenen Spulen entsprechen soll. Die Kurve $ABCDE$ stellt die Änderung des Stromvolumens einer Nut während des Kurzschlusses, bezogen auf die X—X Achse, dar.

Würde das Stromvolumen sich nach der Gerade ACE ändern, so hätten wir dieselben Verhältnisse wie bei einem glatten Anker und geradlinigem Kurzschlußstrom, d. h. die vom Anker- und Streufeld induzierte EMK wäre während des Kurzschlusses konstant und gleich

$$e_q + e_{r_s}.$$

Es ist e_q die vom Ankerquerfeld $B_q = 2\lambda_q AS$ und e_{r_s} die vom Streufelde $\Phi_s = t_1 \, AS\lambda_{N_s}$ induzierte EMK.

Beim glatten Anker haben wir gefunden, daß die gegenseitige Induktion des geradlinigen Kurzschlußstromes der gleichzeitig im Kurzschluß befindlichen Spulen Null oder doch sehr klein ist. Dasselbe gilt hier für die Stromvolumen benachbarter Nuten, d. h. ändern sich die Stromvolumen der gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen benachbarter Nuten geradlinig, so dürfen wir die gegenseitige Induktion zwischen den Leitern der benachbarten Nuten vernachlässigen.

Die Abweichungen des Stromvolumens vom geradlinigen Verlauf müssen wir in bezug auf das erzeugte Feld als zusätzliche Kurzschlußströme des geradlinigen Stromvolumens auffassen. Während die gegenseitige Induktion der geradlinig verlaufenden Stromvolumen benachbarten Nuten durch die Bewegung der nicht kurzgeschlossenen Leiter bezw. durch die Bewegung ihrer MMK-Kurve kompensiert wird, kann die gegenseitige Induktion der zusätzlichen Stromvolumen nicht kompensiert werden. Für letztere kommt also nicht die Streuinduktion, sondern die gesamte Selbstinduktion und die gegenseitige Induktion in Betracht. Da wir somit für die geradlinigen und die zusätzlichen Kurzschlußstromvolumen mit verschiedenen Induktionskoeffizienten[1]) rechnen müssen, teilen wir in Fig. 335 das Stromvolumen der Nut in zwei Teile: in einen Teil, welcher dem geradlinigen Verlauf ACE und einen Teil, welcher dem zusätzlichen Stromvolumen entspricht. Die Ordinaten der schraffierten Flächen entsprechen dem zusätzlichen Stromvolumen.

[1]) Ein Unterschied zwischen dem Koeffizienten der Selbstinduktion des geradlinigen und dem des zusätzlichen Stromes ist auch in Bd. I (s. S. 412) gemacht. Eingehend wird dieser Unterschied begründet von Dr.-Ing. R. Rüdenberg: Theorie der Kommutation in Gleichstromdynamomaschinen. Sammlung elektrotechn. Vorträge 1907.

Digitized by Google

Die durch die geradlinige Änderung des Stromvolumens induzierte EMK ist mit dem Streuinduktionskoeffizienten

$$L_s = 0{,}5 \left(\frac{N}{K}\right)^2 l_i \lambda_{Ns} 10^{-8} \text{ Henry} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (80)$$

zu berechnen, während die durch die Änderung des zusätzlichen Stromvolumens induzierte EMK berechnet werden muß mit dem vollen Selbstinduktionskoeffizienten

$$L_N = 0{,}5 \left(\frac{N}{K}\right)^2 l_i \lambda_{Nz} 10^{-8} \text{ Henry} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (81)$$

Wir wollen zunächst die von den zusätzlichen Stromvolumen der benachbarten kurzgeschlossenen Nuten induzierten EMKe außer Betracht lassen und die vom geradlinigen und vom zusätzlichen Kurzschlußvolumen einer Nut induzierte momentane EMK unter der gemachten Voraussetzung, daß der Kurzschlußstrom der einzelnen Spulen geradlinig verläuft, bestimmen.

Die vom geradlinigen Stromvolumen induzierte EMK ist

$$e_{rs} = L_s \frac{2 u_n i_a}{T_N} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (82)$$

Diese EMK wird in Fig. 335 durch den Abstand der Geraden PQ von der Nullachse 0—0 gegeben.

Die vom zusätzlichen Kurzschlußvolumen induzierte EMK ist:

$$e_{rz} = L_N \left(\frac{2 u_k i_a}{T} - \frac{2 u_n i_a}{T_N}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (83)$$

Es ist u_k die Anzahl der im betrachteten Moment kurzgeschlossenen Spulen der Nut.

Diese EMK wird in Fig. 335 durch den treppenförmigen Linienzug I dargestellt. Es ist PQ die Nullachse für diese Kurve.

Die Momentanwerte der resultierenden EMK werden ebenfalls durch die Kurve I gegeben, jedoch auf die Achse 0—0 bezogen.

Diese resultierende EMK ergibt sich zu:

$$e_r = L_s \frac{2 u_n i_a}{T_N} + L_N \left(\frac{2 u_k i_a}{T} - \frac{2 u_n i_a}{T_N}\right) =$$

$$= 2 \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \frac{t_1 \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right) \beta_D} 10^{-6} +$$

$$+ 2 \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \lambda_{Nz} \left(\frac{u_k \beta}{b_r} - \frac{t_1}{t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right) \beta_D}\right) 10^{-6} =$$

Digitized by Google

$$= \frac{2\left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) t_1 \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D} 10^{-6} +$$

$$+ \frac{2\left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) t_1 \lambda_{Nz}}{t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D} \cdot \frac{\frac{u_k}{2} + \left(\frac{u_k}{u_n} - 1\right)\frac{b_r}{\beta} - \frac{u_k}{u_n}(1-\varepsilon)}{\frac{b_r}{\beta}} 10^{-6} =$$

$$e_r = 2\left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \frac{t_1 (\lambda_{Ns} + C_N \lambda_{Nz})}{t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D} 10^{-6} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (84)$$

worin

$$C_N = \frac{\frac{u_k}{2} + \left(\frac{u_k}{u_n} - 1\right)\frac{b_r}{\beta} - \frac{u_k}{u_n}(1-\varepsilon)}{\frac{b_r}{\beta}} \quad . \quad . \quad . \quad (85)$$

Die Formel 84 gilt allgemein für alle Fälle und gibt uns für einen beliebigen Moment der Kurzschlußzeit die EMK e_r, wenn wir u_k gleich der Zahl der in diesem Moment kurzgeschlossenen Spulenseiten der betrachteten Nut setzen.

Ist $\frac{b_r}{\beta} > \frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon$, so tritt die maximale EMK allgemein in der Mitte des Kurzschlusses auf. Es ist dann für die Mitte des Kurzschlusses $u_k = u_n$. Für diesen Fall wird die Konstante C_N für Parallelwicklung und unverkürzte Spulenweite $\left(y_1 = \frac{K}{p} + 1\right.$ und $\left.\varepsilon = 0\right)$

$$C_N = \frac{\frac{u_n}{2} - 1}{\frac{b_1}{\beta}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (86)$$

Diese Konstante ist für $u_n = 4$, $u_n = 6$ und $u_n = 8$ in Fig. 336 in Abhängigkeit der Bürstendeckung $\frac{b_1}{\beta}$ aufgetragen.

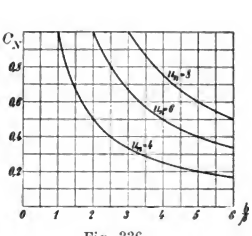


Fig. 336.

Ist $\frac{b_r}{\beta} < \frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon$, so tritt die maximale induzierte EMK nicht immer in der Mitte des Kurzschlusses auf und es ist stets $u_k < u_n$. Man erhält in diesen Fällen nur einen richtigen Einblick,

Digitized by Google

wenn man die Kurve der induzierten EMKe in der in Fig. 335 angegebenen Weise aufträgt.

Wir wollen jetzt die von den Stromvolumen der benachbarten kurzgeschlossenen Nuten in den Spulen der betrachteten Nut induzierten EMKe ermitteln. Derjenige Teil der Kurven, welcher den Verlauf des Stromvolumens der benachbarten Nuten darstellt und der innerhalb der Kurzschlußzeit der betrachteten Nut liegt, ist in Fig. 335 punktiert eingezeichnet ($a\ K\ L$ und $M\ N\ e$). Die vom geradlinigen Kurzschlußvolumen der benachbarten Nuten induzierten EMKe sind zu vernachlässigen; wir müssen somit hier nur die vom zusätzlichen Stromvolumen induzierten EMKe betrachten. Das zusätzliche Stromvolumen der benachbarten Nuten ist in Fig. 335 durch die Linienzüge $a\ k\ C$ und $C\ n\ e$ gegeben.

Die Koeffizienten der gegenseitigen Induktion haben wir früher (Bd. I, S. 379 und 404) berechnet, sie lassen sich auch aus Versuchen, die von Dr.-Ing. H. Niebuhr[1]) am E. T. I. zu Karlsruhe ausgeführt wurden, ermitteln. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Fig. 337 dargestellt.

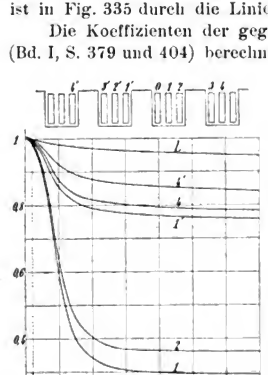


Fig. 337.

Die mit L bezeichnete Kurve stellt die Änderung der Selbstinduktion mit der Periodenzahl dar. Die Selbstinduktion wurde unter Einführung des normalen Betriebstromes in die Spule 0 bestimmt (Anker außerhalb des Magnetgestells). Der Ordinatenmaßstab ist so gewählt, daß die Ordinate 1 der Selbstinduktion bei 50 Perioden entspricht. Wie ersichtlich, ist die Änderung nicht groß, sie beträgt bei Änderung von 50 auf 1750 Perioden ca. 5%. Die anderen Kurven stellen die scheinbare Selbstinduktion der Spule 0 in Abhängigkeit von der Periodenzahl dar, wenn bezw. die Spulen 4', 4, 1', 2 und 1 widerstandslos kurzgeschlossen sind.

Das Verhältnis der scheinbaren zur wirklichen Selbstinduktion wollen wir als Dämpfungsfaktor k_d bezeichnen. Er ist abhängig von der Lage der betrachteten Nut zu den übrigen kurzgeschlossenen Nuten, von der Periodenzahl, dem Widerstande des Strom-

[1]) Experimentaluntersuchungen über die Selbstinduktion in Nuten gebetteter Spulen bei hoher Frequenz. Berlin 1907. Julius Springer.

Digitized by Google

kreises der kurzgeschlossenen Spulen und der magnetischen und elektrischen Leitfähigkeit der im Bereiche des von der betrachteten Spule erzeugten Magnetfeldes liegenden Metallteile. Die Dämpfung ist groß, wenn die betrachtete Spule mit mehreren kurzgeschlossenen Spulen in einer Nut liegt, wenn die Periodenzahl groß, der Übergangswiderstand der Bürsten klein und massive Metallteile in der Nähe sind.

Über etwa 700 Perioden zeigen die Kurven einen annäherend konstanten Wert des Dämpfungsfaktors. Dieser beträgt, wenn eine Spule in der gleichen Nut kurzgeschlossen ist, ca. 0,35, wenn eine Spule in der benachbarten Nute kurzgeschlossen ist, ca. 0,82 und wenn eine Spule in der übernächsten Nut kurzgeschlossen ist, ca. 0,90.

Da der Schließungswiderstand der Spulen auf die Dämpfung einen großen Einfluß hat und die Spulen bei der Kommutation über den verhältnismäßig großen Übergangswiderstand am Kommutator kurzgeschlossen sind, wird die Dämpfung bei der Kommutation kleiner sein und zwar bei Kohlenbürsten kleiner als bei Kupferbürsten.

Die Kurven der Fig. 337 entsprechen bestimmten Verhältnissen[1]) und einer verhältnismäßig kleinen Nutenteilung. Bei größerer Nutenteilung wird die Dämpfung etwas kleiner bezw. k_d etwas größer werden.

Der Koeffizient der gegenseitigen Induktion $M_{1,x}$ ergibt sich aus der Gleichung

$$k_d L_1 = L_1 - \frac{\omega^2}{\left(\frac{R_2}{L_2}\right)^2 + \omega^2} \cdot \frac{M_{1,x}^2}{L_1} = L_1 - k_\omega \cdot \frac{M_{1,x}^2}{L_2}.$$

Der Faktor k_ω ist abhängig von der Periodenzahl $c = \frac{\omega}{2\pi}$ und dem Verhältnis des Widerstandes R_2 der Sekundärspule zu ihrem Selbstinduktionskoeffizienten. Dieses Verhältnis ändert sich mit der Periodenzahl, es muß daher k_ω experimentell bestimmt werden. Da $L_1 = L_2 = L_N$ gesetzt werden darf, erhalten wir dann

$$M_{1,x} = \sqrt{\frac{1 - k_d}{k_\omega}} \cdot L_N.$$

Die auf diese Art von Dr.-Ing. H. Niebuhr[2]) experimentell bestimmten Werte sind größer als die früher (Bd. I, S. 404) berechneten.[3])

Für die graphische Darstellung wurde in Fig. 335 $M_{1,2} = 0{,}3\, L_N$ gewählt. Wir erhalten dann für die induzierten EMKe der gegenseitigen Induktion der Leiter benachbarter Nuten auf die Leiter der betrachteten Nut die punktierte Kurve *II* (in bezug auf die Achse *PQ*). In unserem Beispiel tritt eine Dämpfung auf, welche einfach

[1]) Der für den Versuch verwendete vierpolig bewickelte Anker hat folgende Abmessungen: Durchmesser 29 cm, Eisenlänge 10 cm plus ein Luftschlitz von 1 cm, Nutenzahl 53, Nutenteilung 17,2 mm, Nutentiefe 26 mm, Nutenweite 7,2 mm. — [2]) l. c. — [3]) Siehe Tabellen im Nachtrag.

Digitized by Google

zu berücksichtigen wäre, indem wir λ_{Nz} mit einem Koeffizienten < 1 multiplizierten. Dies ist jedoch nicht allgemein zulässig. Ist z. B. in unserem Fall die Bürstenbreite etwas kleiner als 2,5 Lamellenteilungen, so tritt in der Mitte der Kurzschlußzone der betrachteten Nut keine Dämpfung auf. In vielen Fällen tritt, auch bei praktisch vorkommenden Bürstenbreiten, eine Erhöhung der maximalen EMK durch die gegenseitige Induktion auf. Diese Vorgänge sind im allgemeinen nur zu verfolgen, wenn man ein Schema ähnlich demjenigen der Fig. 335 aufzeichnet. Für unsere normalen Berechnungen wollen wir die gegenseitige Induktion des zusätzlichen Stromvolumens benachbarter Nuten außer Betracht lassen.

Wollen wir nun die durch das Streufeld der Spulen induzierten EMKe kompensieren, so ist bei dieser Vernachlässigung ein Feld erforderlich, welches die gleiche treppenförmige Gestalt wie die Kurve *I* Fig. 335 hat. Da es jedoch nicht möglich ist, dem kommutierenden Feld eine treppenförmige Gestalt zu geben, und zwar auch bei Anwendung von Wendepolen nicht, so kann die Bedingung $e_o - (e_q + e_r) = 0$ nicht dauernd, sondern nur während einzelnen Momenten der Kurzschlußzeit erfüllt werden. Wir erhalten daher keine geradlinige Kommutation, sondern es werden zusätzliche Kurzschlußströme auftreten, die um so größer werden, je größer C_N ist, es soll daher bei großen Werten der mittleren Reaktanzspannung die Konstante C_N klein bezw. Null sein.

Verlaufen die Kurzschlußströme der einzelnen Spulen nicht, wie bisher angenommen, geradlinig, so wird die maximale Reaktanzspannung durch die zusätzlichen Kurzschlußströme der einzelnen Spulen im allgemeinen vergrößert werden, jedoch üben diese Kurzschlußströme (s. Bd. I, S. 393) eine dämpfende Wirkung aufeinander aus, so daß dadurch das Maximum um so mehr begrenzt wird, je kleiner der Faktor k_d ist. Die Wirkung und der Einfluß dieser zusätzlichen Kurzschlußströme ist jedoch der Rechnung nicht zugänglich, weil wir die Größe und den zeitlichen Verlauf dieser Ströme nicht kennen. Wie kompliziert die Vorgänge in Wirklichkeit sind, zeigen die Fig. 345 und 347, welche den zeitlichen Verlauf der Kurzschlußspannung Je darstellen. Auf diesen Verlauf haben auch die Schwingungen und Schwankungen des Feldes (Oberfelder) die bei Zahnankern immer vorhanden sind, erheblichen Einfluß. Wir müssen uns daher bei unseren Rechnungen auf den geradlinigen Kurzschlußstrom beschränken.

Gegenüber der in Band I aufgestellten Theorie besteht der Unterschied im wesentlichen darin, daß wir die Leitfähigkeit des Streuflusses (λ_{k_s}) nur über die halbe Zahnteilung rechnen und daß der Berechnung der Kurzschlußspannung die mittlere Reaktanzspan-

Digitized by Google

nung einer Spule zugrunde gelegt und von der umständlichen Berechnung der maximalen Kurzschlußspannung abgesehen wird. Bei schwierigen Kommutationsverhältnissen wird dagegen die maximale Reaktanzspannung einer Spule berechnet.

65. Berechnung des Wendefeldes und der Wendepole.

In den meisten Fällen genügt es, das Wendefeld über die ganze Kurzschlußzone konstant zu machen, und zwar so groß, daß die mittlere EMK e_{rs} kompensiert wird. Die erforderliche Feldstärke wird dann

für $2p$ Wendepole $$B_{wl} = \frac{2 t_1 A S \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \frac{l_1}{l_w} + 2 A S \lambda_{q_0} \frac{l_1 - l_w}{l_w} \quad (87)$$

für p Wendepole $$B_{wl} = \frac{2 t_1 A S \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \frac{2 l_1}{l_w} + 2 A S \lambda_{q_0} \frac{2 l_1 - l_w}{l_w} \quad (87a)$$

Ist der Wicklungsschritt stark verkürzt, so ist an Stelle von $\frac{a}{p}\beta_D$ in diese Formeln $\left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D$ einzusetzen.

Die Leitfähigkeit λ_{N_s} unter dem Wendepol und in der Luft wurde gleich angenommen, da, wie ein Blick auf die Fig. 334 S. 273 zeigt, λ_{k_s} unter dem Wendepol nicht wesentlich von λ_{k_s} in der Luft abweicht.

Es ist

$$\lambda_{N_s} = \lambda_n + \lambda_{k_s} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 1{,}25\left(\frac{r}{3 r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{r_7}{r_8} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_8} + \frac{r_4}{r_1}\right) +$$

$$+ 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi t_1}{2 r_1} + 0{,}23 \frac{l_s}{l_i} \log_{10}\left(\frac{2 l_s}{U_s}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

Die Wendepolbreite b_w ist so zu wählen, daß annähernd

$$b_w = t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (89)$$

Es ist $\varepsilon = \pm \frac{1}{2}\left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right)$ und das Vorzeichen ist so zu wählen, daß ε positiv wird.

Um die seitliche Streuung auszunützen, wird jedoch öfters b_w kleiner, als Gl. 89 ergibt, genommen. (Siehe S. 286, letzter Absatz.)

Ist die Spulenweite nicht verkürzt und liegen $2p$ Bürstensätze auf, so kann man schreiben

$$b_w \cong t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (90)$$

Die ideelle Wendepolbreite ist

$$b_{wi} = b_w + 4{,}5\,\delta_w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (91)$$

Digitized by Google

Die Wendepollänge l_w wird öfters kleiner als die Ankerlänge gewählt, und zwar um einerseits die Windungslänge der Wendepolwicklung zu verkleinern, andererseits um ein stabileres Wendefeld zu erhalten.

Ist l_w erheblich kürzer als l_1, so wird die ideelle Wendepollänge

$$l_{wi} = l_w + 3\delta_w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (92)$$

Der Luftkraftfluß unter dem Wendepol ist jetzt gleich

$$\Phi_{wa} = B_{wl} b_{wi} l_{wi} = B_{wl}(b_w + 4{,}5\,\delta_w)(l_w + 3\delta_w) \quad . \quad (93)$$

Der Kraftfluß in den Wendepolschenkeln

$$\Phi_{wm} = \sigma_k \Phi_{wa} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (94)$$

σ_k ist der Streukoeffizient der Wendepole (Bd. I, S. 566).

Er liegt meistens zwischen 1,3 und 1,6, kann aber bei langen und breiten Polschenkeln mit langen Erregerspulen erheblich größer werden.

Die Induktion im Wendepolschenkel $B_{wm} = \dfrac{\Phi_{wm}}{Q_{wm}}$ ist klein zu wählen, damit die Magnetisierungskurve des Wendepolkreises annähernd geradlinig verläuft. Es soll daher bei Verwendung von Schmiedeeisen oder Stahlguß mit der Induktion nicht über 12000 gegangen werden. Auch soll das Joch nicht stark gesättigt werden.

Die **Kraftflußverteilung bei der Anordnung von $2p$ Wendepolen** ist derartig, daß der Wendepolkraftfluß sich im Joch und Anker in gleichen Teilen nach links und rechts wendet und sich durch die benachbarten (ungleichnamigen) Wendepole schließt.

Die Kraftflüsse im Joch und im Anker sind somit zwischen dem Wendepol und dem gleichnamigen Hauptpol

$$\Phi_j'' = \frac{1}{2}(\Phi_m - \Phi_{wm}) \quad \text{und} \quad \Phi_a'' = \frac{1}{2}(\Phi_b - \Phi_{wa}) \quad (95a)$$

und zwischen dem Wendepol und dem ungleichnamigen Hauptpol

$$\Phi_j' = \frac{1}{2}(\Phi_m + \Phi_{wm}) \quad \text{und} \quad \Phi_a' = \frac{1}{2}(\Phi_b + \Phi_{wa}) \quad (95b)$$

Die erforderliche Amperewindungszahl AW_w eines Wendepolpaares bei Anordnung von $2p$ Wendepolen ergibt sich zu:

$$AW_w = \tau AS + AW_N, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (96)$$

worin

$$AW_N = AW_{wl} + AW_{wz} + AW_{wm} + AW_a' - AW_a'' + AW_j' - AW_j'' \quad (97)$$

Es ist

$$AW_a' = aw_a' \cdot \frac{1}{2} L_{wa} \qquad AW_j' = aw_j' \cdot \frac{1}{2} L_{wj}$$

Digitized by Google

$$AW_a'' = aw_a'' \cdot \frac{1}{2} L_{wa} \qquad AW_j'' = aw_j'' \cdot \frac{1}{2} L_{wj},$$

wenn L_{wa} und L_{wj} die Längen der mittleren Kraftlinie im Anker bezw. im Joch zwischen zwei benachbarten Wendepolen sind. aw bezeichnet die Amperewindungen pro Zentimeter Kraftlinienlänge, welche der durch den betreffenden Kraftfluß (bezw. Φ_a', Φ_a'', Φ_j', Φ_j'') bedingten Induktion des betrachteten Querschnittes entsprechen.

Die **Kraftflußverteilung bei der Anordnung von p Wendepolen** ist derartig, daß, wenn die Sättigungen der Maschine nicht zu hoch sind und der Wendepolkraftfluß im Verhältnis zum Hauptkraftfluß nicht zu groß ist, man auch annehmen darf, daß sich der Wendepolkraftfluß im Joch und Anker in gleichen Teilen nach links und rechts wendet. Der Wendepolkraftflußschließt sich durch die benachbarten Hauptpole (Fig. 338).

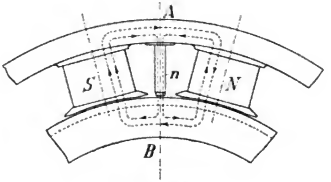


Fig. 338.

Betrachten wir die Fig. 338, welche den Fall darstellt, daß alle Wendepole Nordpole sind, so sehen wir, daß in dem gezeichneten Teil die Induktionen links von der Linie AB erhöht und die Induktionen rechts von der Linie AB verkleinert werden. Versehen wir die Kraftflüsse links von AB mit einem Strich und die rechts von AB mit zwei Strichen, so kann man schreiben

$$\Phi_j' = \Phi_m + \frac{\Phi_{wm}}{2}; \qquad \Phi_j'' = \frac{\Phi_m - \Phi_{wm}}{2}$$

$$\Phi_a' = \frac{\Phi_b + \Phi_{wa}}{2}; \qquad \Phi_a'' = \frac{\Phi_b - \Phi_{wa}}{2}$$

$$\Phi_m' = \Phi_m + \frac{\Phi_{wm}}{2}; \qquad \Phi_m'' = \Phi_m - \frac{\Phi_{wm}}{2}$$

$$\Phi_l' = \Phi_b + \frac{\Phi_{wa}}{2}; \qquad \Phi_l'' = \Phi_b - \frac{\Phi_{wa}}{2}$$

Hieraus ergeben sich die Induktionen und die Amperewindungen für die verschiedenen Kreisteile.

Wir bezeichnen mit

$$\Sigma AW' = AW_l' + AW_z' + AW_a' + AW_m' + AW_j',$$

$$\Sigma AW'' = AW_l'' + AW_z'' + AW_a'' + AW_m'' + AW_j''$$

und $$\Sigma AW_w = AW_{wl} + AW_{wz} + AW_{wm}.$$

Digitized by Google

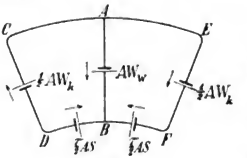


Fig. 339.

In Fig. 339 ist der gemeinschaftliche Kreis des Haupt- und Wendekraftflusses schematisch aufgezeichnet und die MMKe sind eingetragen.

Für den Kreis $ABDCA$ können wir schreiben

$$\frac{1}{2} AW_k + AW_w - \frac{\tau}{2} AS = \Sigma AW' + \Sigma AW_w$$

und für den Kreis $ABFEA$

$$-\frac{1}{2} AW_k + AW_w - \frac{\tau}{2} AS = -\Sigma AW'' + \Sigma AW_w .$$

Hieraus ergibt sich

$$AW_w = \frac{\Sigma AW' - \Sigma AW''}{2} + \Sigma AW_w + \frac{\tau}{2} AS \quad \ldots \quad (98)$$

und

$$AW_k = \Sigma AW' + \Sigma AW''$$

Es entspricht AW_w der Amperewindungszahl eines Wendepoles und $\frac{1}{2} AW_k$ der Amperewindungszahl eines Hauptpoles.

66. Form und Stärke des Wendefeldes.

Wir haben früher festgestellt, daß die vom Eigenfeld induzierte EMK nur dann konstant ist, wenn wir nur zwei Spulenseiten in einer Nut haben, die gleichzeitig in den Kurzschluß treten oder wenn die Bürstenbreite gleich oder kleiner ist als eine Lamellenteilung. In allen anderen Fällen hat die vom Eigenfeld induzierte EMK e_r Treppenform.

Wenn wir nun die Bedingung aufstellen, daß das Wendefeld die EMK e_r in jedem Moment kompensieren soll, so ist die räumliche Verteilung des Wendefeldes eine Funktion der momentan kurzgeschlossenen Spulenseiten u_k. Aus den Gl. 84 und 87 erhalten wir für die erforderliche Stärke des Wendefeldes, wenn wir den Einfluß der Verkürzung der Spulenweite, die bei Wendepolen nur klein sein darf, vernachlässigen und ε gleich Null setzen

für $2p$ Wendepole

$$B_{wl} = \frac{2 t_1 AS (\lambda_{Ns} + C_N \lambda_{Nz})}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D} \cdot \frac{l_1}{l_w} + 2AS \lambda_{q0} \frac{l_1 - l_w}{l_w} \quad \ldots \quad (99a)$$

Digitized by Google

für p Wendepole

$$B_{wl} = \frac{2t_1 \, AS\,(\lambda_{Ns} + C_N \lambda_{Nz})\,\frac{2l_1}{l_w} + 2\,AS\,\lambda_{qo}\,\frac{2l_1 - l_w}{l_w}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \quad \ldots \quad (99\,\text{b})$$

Es ist allgemein

$$C_N = \frac{\frac{u_k}{2} + \left(\frac{u_k}{u_n} - 1\right)\frac{b_r}{\beta} - \frac{u_k}{u_n}}{\frac{b_r}{\beta}}.$$

Es ist für $2p$ Wendepole

$$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1)\,\lambda_{kz}\,\frac{l_w}{l_1} \quad \ldots \quad (100\,\text{a})$$

und für p Wendepole

$$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1)\,\lambda_{kz}\,\frac{l_w}{2l_1} \quad \ldots \quad (100\,\text{b})$$

Die Formeln zur Berechnung von λ_{nz}, λ_{kz} und λ_s stehen auf Seite 290. (Werte für k_w siehe S. 293.)

Man hat versucht, den treppenförmigen Verlauf des Wendefeldes durch besondere Formgebung des Wendepolschuhes zu erreichen. So teilt Dr. Lehmann (D. R. P. Nr. 160392) die Wendepolbreite in verschiedene einzelne Teile. Bei jedem dieser Teile kann der Abstand vom Anker besonders eingestellt werden. Eine gute Anlehnung an die treppenförmige Kurve erhält man auch, indem man den Polbogen der Wendepole verhältnismäßig schmal macht und die Polschuhe schräg stellt. In Fig. 340 stellt Kurve *I* die Feldkurve des geraden Wendepols dar. Stellt man den Wendepolschuh schräg, so werden in den Spulen unter dem Wendepole EMKe induziert, welche der Feldkurve *II* entsprechen. Man sieht, daß die Feldkurve *II* allmählicher abfällt als die Kurve *I*.

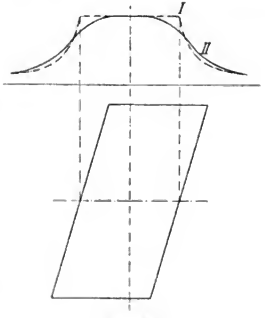


Fig. 340.

Die Induktion unter dem Wendepole ist bei einer derartigen Anordnung entsprechend der maximalen induzierten EMK in Fig. 335 einzustellen. Diese Induktion ist aus Gl. 99a und 99b zu berechnen,

Digitized by Google

indem man in diese Gleichungen für u_k die maximale Anzahl der sich pro Nut im Kurzschluß befindlichen Spulenseiten einsetzt.

Man erhält in diesem Fall für Parallelwicklungen mit unverkürzter Spulenweite und $\frac{b_1}{\beta} > \frac{u_n}{2} - 1$.

$$C_N = \frac{\frac{u_n}{2} - 1}{\frac{b_1}{\beta}}.$$

Diese Konstante kann der Fig. 336, S. 277 entnommen werden.

Stärke des Wendefeldes für eine Stromdichte gleich Null an der ablaufenden Bürstenkante. Wie auf S. 576, Bd. I erläutert wurde, ist die geradlinige Kommutation nicht mehr funkenfrei, wenn die effektive Reaktanzspannung e_s eine gewisse Grenze (etwa 1 Volt) überschreitet. Es muß dann das Wendefeld derart verstärkt werden, daß die Stromdichte unter der ablaufenden Lamelle klein bezw. gleich Null wird, ohne jedoch die Stromdichte an der auflaufenden Bürstenkante unzulässig zu erhöhen. In diesem Fall ist es zweckmäßig, mit einem nach der Polmitte oder nach der Austrittkante zu wachsenden Wendefelde zu kommutieren.

Die am Ende der Kurzschlußzeit erforderliche zusätzliche EMK ist nach Bd. I, S. 576

$$e_{zT} = s_u (B_{wT} - 100\, v_k\, l_B\, S) - \Delta P_a$$

und die zusätzliche Feldstärke

$$B_{wz} = \frac{e_{zT} \cdot 10^8}{\frac{N}{K}\, l_w\, v}.$$

Die Gleichung für S (Gl. 121) findet man auf Seite 293.

Diese Feldstärke B_{wz} ist zu derjenigen zu addieren, die wir aus Gl. 99a oder 99b erhalten, indem wir in den Ausdruck für C_N den dem Ende der Kurzschlußzeit entsprechenden Wert von u_k einsetzen, um die gesamte am Ende der Kurzschlußzeit erforderliche Stärke des Wendefeldes zu erhalten.

Sofern diese Feldstärke den größten Wert besitzt, erweist es sich als vorteilhaft, bei einem Generator die Bürsten um so viel gegen die Drehrichtung, bezogen auf die Wendepolmitte, zu verstellen, daß eine Spule annähernd unter der Mitte des Wendepoles, also im stärksten Felde, aus dem Kurzschluß und außerhalb des Wendepoles, d. h. im Streufeld desselben, in den Kurzschluß tritt.

Aus obigen Darlegungen geht hervor, daß die Wendepole nach zwei Gesichtspunkten geformt werden können, entweder breit für

Digitized by Google

ein konstantes Wendefeld, oder schmal mit in der Kommutierungszone veränderlichem Feld. Je größer die Konstante C_N ist, um so mehr erscheint die letztere Form als geeignet.

67. Stabilität des Wendefeldes.

Stehen die Bürsten genau unter der Mitte des Wendepols und verläuft das Kurzschlußvolumen einer Nut geradlinig, so üben die kurzgeschlossenen Spulen nur eine längsmagnetisierende Wirkung auf die Wendepole aus. Sobald jedoch die Bürste nicht genau unter der Mitte des Wendepols steht oder zusätzliche Kurzschlußströme auftreten, tritt eine Quermagnetisierung und Verdrehung des Wendefeldes auf. Abgesehen von dem Fall, in welchem das zusätzliche Kurzschlußstromvolumen außerordentlich groß ist, tritt die größte quermagnetisierende Wirkung des Ankerfeldes dann auf, wenn die Bürste unter der Kante oder außerhalb des Wendepols steht. Es sind dann die quermagnetisierenden Amperewindungen gleich $b_w AS$. Da die Bürsten meistens nicht genau in der Mitte des Wendepols stehen und im allgemeinen zusätzliche Kurzschlußströme auftreten, so wird immer eine Quermagnetisierung vorhanden sein und wir finden in dem Verhältnis $\frac{AW_{wl}}{b_w AS}$ ein Maß für diese Quermagnetisierung. Die Bürstenstellung wird um so empfindlicher sein, je kleiner dieses Verhältnis ist. Es ist zu empfehlen

$$\frac{AW_{wl}}{b_w AS} > 1{,}5 \text{ bis } 2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (101)$$

zu machen.

Aus dieser Überlegung geht der Vorteil einer Verkleinerung der Wendepollänge hervor. Durch diese Verkleinerung wächst AW_{wl} und somit die Stabilität des Feldes, während das Gewicht des Wendepolkupfers nur wenig beeinflußt wird, da mit zunehmender Windungszahl die Windungslänge abnimmt [1]).

Um die quermagnetisierende Wirkung zu verkleinern, kann auch der magnetische Widerstand für den Querfluß erhöht werden, indem man den Wendepol in der Längsrichtung bis zu einer Tiefe von etwa 6 bis 12 cm oder noch tiefer aufschlitzt.

---

[1]) Sieho auch W. Oelschläger, ETZ 1907, S. 257.

Digitized by Google

68. Nachrechnung der Maschine bezüglich Kommutierung.

a) Maschinen ohne künstliche Kommutation. Bei Maschinen ohne künstliche Kommutation wollen wir zur Prüfung der Kommutation die Kurzschlußspannung und die effektive Reaktanzspannung berechnen.

Als Kurzschlußspannung haben wir die mittlere EMK, welche in der maximalen Anzahl der zwischen den Bürstenkanten kurzgeschlossenen Spulen induziert wird, bezeichnet. Stehen die Bürsten in der neutralen Zone, so wird diese EMK mit Δe_o bezeichnet, sie wird um so größer, je größer die Belastung der Maschine ist. Stellt man dagegen die Bürsten so ein, daß die Kurzschlußspannung bei Vollast gleich, aber entgegengesetzt gerichtet derjenigen bei Leerlauf ist, so wird sie mit Δe_v bezeichnet.

Als effektive Reaktanzspannung[1]) haben wir die EMK bezeichnet, welche vom Eigenfeld in derjenigen Spule induziert wird, die als letzte der Nut in den Kurzschluß tritt, und zwar in dem Momente, in welchem sie den Kurzschluß verläßt.

Die Formeln für diese EMKe lauten

$$\Delta e_o = 2 S_k \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \left(\frac{t_1 \lambda_{N s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} + \lambda_{q o}\right) 10^{-6} \text{ Volt} \quad (102a)$$

$$\Delta e_v = S_k \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \left(\frac{t_1 \lambda_{N s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} + \lambda_{q v}\right) 10^{-6} \text{ Volt} \quad (102b)$$

$$e_s = l_u (1 + p_w) \frac{\beta}{b_r} \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) k_d \lambda_{L z} 10^{-6} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad (103)$$

Setzt man $f_u = 1{,}25$ und $k_d = 0{,}80$, so wird

$$e_s = (1 + p_w) \frac{\beta}{b_r} \left(\frac{N}{K} l_i v A S\right) \lambda_{L z} \cdot 10^{-6} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad (104)$$

Bei schwierigen Kommutationsverhältnissen ist noch das Verhältnis der maximalen zur mittleren Reaktanzspannung einer Spule (bei der Annahme geradliniger Kommutation in jeder Spule) zu prüfen. Dieses Verhältnis ist

$$\frac{\lambda_{N s} + C_N \lambda_{N z}}{\lambda_{N s}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (105)$$

[1]) Da abweichend von den in Bd. I gegebenen Berechnungen jetzt die mittlere und die maximale Reaktanzspannung einer Spule berechnet wird, wäre es besser, der Spannung e_z, die mit den beiden ersten in keiner bestimmten Beziehung steht, einen anderen Namen zu geben. Man kann e_z die Funkenspannung nennen.

Digitized by Google

worin

$$C_N = \frac{\frac{u_k}{2} + \left(\frac{u_k}{u_n} - 1\right)\frac{b_r}{\beta} - \frac{u_k}{u_n}(1-\varepsilon)}{\frac{b_r}{\beta}}.$$

Es ist für u_k die maximale Anzahl der gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulenseiten einer Nut einzusetzen.

Ist $\frac{b_r}{\beta} > \frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon$, so ist $u_k = u_n$ zu setzen. Für diesen Fall wird die Konstante C_N

$$C_N = \frac{\frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon}{\frac{b_r}{\beta}}.$$

Dieser Wert ist für verschiedene Werte von u_n der Fig. 337 S. 278 zu entnehmen.

Es ist in den obigen Formeln:

S_k = maximale Anzahl der zwischen den Bürstenkanten kurzgeschlossenen Spulen $= \left(\frac{b_1}{\beta}\right) \frac{p}{a}$,

p_w = Anzahl der aufeinander folgenden weggelassenen gleichnamigen Bürsten,

b_r = auf Parallelwicklung reduzierte Bürstenbreite (S. 360, Bd I),

$$= b_1 + \beta\left[1 - (1 + p_w)\frac{a}{p}\right]$$

b_D = auf den Ankerumfang reduzierte Bürstenbreite $= b_1 \frac{D}{D_k}$ in cm,

β_D = auf den Ankerumfang reduzierte Lamellenteilung $\beta \frac{D}{D_k}$ in cm,

l_1 = Nutenteilung in cm,

$\frac{N}{K} l_i v A S \cdot 10^{-6}$ = Ankerkonstante,

λ_{Ns} = Leitfähigkeit des vom Stromvolumen einer Nut hervorgerufenen Streufeldes, auf 1 cm Ankerlänge reduziert,

λ_{Nz} = Leitfähigkeit des vom Stromvolumen einer Nut hervorgerufenen totalen Eigenfeldes, auf 1 cm Ankerlänge reduziert,

λ_{Lz} = Leitfähigkeit des vom Strome einer Spule hervorgerufenen totalen Eigenfeldes, auf 1 cm Ankerlänge reduziert.

Digitized by Google

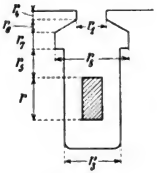


Fig. 341.

Für Nutenanker ist

$$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} \quad . \quad (106)$$

$$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} \quad . \quad (107)$$

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} \quad . \quad . \quad . \quad (108)$$

Es ist für die Nut nach Fig. 341

$$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{r_7}{r_8} + \frac{2\,r_6}{r_1 + r_8} + \frac{r_4}{r_1}\right) \quad . \quad (109a)$$

und für die offene Nut

$$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (109b)$$

und

$$\lambda_{nz} = 1{,}25\left(k_n \frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{r_7}{r_8} + \frac{2\,r_6}{r_1 + r_8} + \frac{r_4}{r_1}\right) \quad . \quad (110a)$$

bezw.

$$\lambda_{nz} = 1{,}25\left(k_n \frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (110b)$$

Es ist für Drahtwicklungen $k_n = 0{,}6$ bis $0{,}8$ und für Stabwicklungen $k_n \simeq 0$.

$$\lambda_{ks} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi\, t_1}{2\, r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (111)$$

$$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi\,(\tau - b_i)}{r_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (112)$$

$$\lambda_s = 0{,}46 \log_{10}\left(\frac{2\,l_s}{U_s}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (113)$$

$l_s \simeq 1{,}4\,\tau + 5$ cm und $U_s =$ Umfang eines Spulenkopfes. Für λ_s kann man annähernd 0,8 setzen.

Das Glied $t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D$ ist nur dann richtig, wenn die Spulenweite unverkürzt ist $\left(y_1 = \frac{K}{p} + 1\right)$ und $2p$ Bürstensätze aufliegen. Allgemein soll das Glied heißen

$$t_1 + b_D - \left[(1 + p_w)\frac{a}{p} - \varepsilon\right]\beta_D,$$

worin

$$\varepsilon = \pm\frac{1}{2}\left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right).$$

Digitized by Google

Das Vorzeichen ist immer so zu wählen, daß ε positiv ist. λ_q = Leitfähigkeit des Ankerfeldes in der neutralen Zone für 1 cm Ankerlänge, und zwar λ_{q_0}, wenn die Bürsten in der neutralen Zone stehen, während mit λ_{q_v} die Leitfähigkeit bezeichnet ist, wenn man die Bürsten aus der neutralen Zone verstellt.

Die Leitfähigkeit λ_q kann, wie auf Seite 461, Bd. I erörtert, entweder nach der Formel

$$\lambda_q = \frac{b_z - \frac{AW_p}{2AS}}{1{,}6\,\delta_a} + \frac{\tau - b_z}{1{,}6\,\delta_b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (114)$$

berechnet werden, oder ist, wenn man sich mit einem annähernden Wert begnügt, den Kurven Fig. 342 und 343 zu entnehmen.

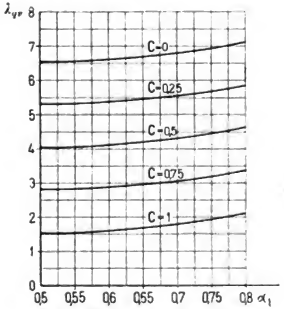


Fig. 342. Kurven für λ_{q_v}.

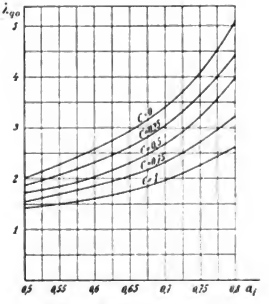


Fig. 343. Kurven für λ_{q_0}.

In diesen Kurven ist

$$C = \frac{AW_p}{b_i\,AS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (115)$$

Zulässige Werte von e_s und Δe. Für die zulässigen Werte von e_s sei auf S. 536, Bd. I verwiesen. Wenn möglich soll $e_s \leq 0{,}5$ bis 0,6 Volt sein.

Für Δe ergeben sich etwa folgende zulässige Werte:

für Hauptschlußmaschinen mit Bürstenstellung in der geometrisch neutralen Zone

$$\Delta e_0 \text{ bis } 12 \text{ Volt},$$

für Nebenschlußmaschinen mit Bürstenstellung in der geometrisch-neutralen Zone

$$\Delta e_0 \text{ bis } 10 \text{ Volt},$$

Digitized by Google

für Nebenschlußmaschinen mit verstellten Bürsten

$$\Delta e_v \text{ bis } 9 \text{ Volt.}$$

Die Berechnung der Kurzschlußspannung und der effektiven Reaktanzspannung ermöglicht noch kein endgültiges Urteil über die Güte der Kommutation, da diese noch von vielen anderen Faktoren abhängt, wie im Kapitel 24, Bd. I ausführlich erörtert ist.

b) Maschinen mit künstlicher Kommutation. Zur Prüfung der Kommutation bei Maschinen mit Wendepolen trägt man die vorhandene Feldstärke unter dem Wendepol in Abhängigkeit von dem Belastungsstrom (Magnetisierungskurve des Wendepolkreises) und die für eine geradlinige Kommutation erforderliche Feldstärke in Abhängigkeit von dem Belastungsstrom auf. Letztere Abhängigkeit ist aus der Formel 87 oder 87a, S. 281, zu berechnen und gibt somit eine geradlinige Funktion. Aus der größten Ordinatendifferenz beider Kurven ergibt sich der größte Feldfehler ΔB_{wl}. Dadurch wird eine Kurzschlußspannung induziert

$$\Delta e_w = S_k \frac{N}{K} l_{wi} v \, \Delta B_{wl} 10^{-6} \text{ Volt}, \quad . \quad . \quad . \quad (116)$$

welche kleiner als etwa 10 Volt sein soll.

Weiter ist auch hier die Kommutation auf die effektive Reaktanzspannung[1]) zu prüfen.

Es ist nach Gl. 104, S. 288, wenn $2p$ Bürstensätze vorhanden sind ($p_w = 0$)

$$e_s = \frac{\beta}{b_r} \left(\frac{N}{K} l_i v \, AS \right) \lambda_{Lz} \cdot 10^{-6} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad (117)$$

bei Anwendung von $2p$ Wendepolen ist

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1) \lambda_{kz} \frac{l_w}{l_i} \quad . \quad . \quad (118)$$

bei Anordnung von p Wendepolen

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1) \lambda_{kz} \frac{l_w}{2 l_i} \quad . \quad . \quad (119)$$

Die Werte von λ_{nz}, λ_{kz} und λ_s sind auf S. 290 gegeben.

Das letzte Glied der Gleichungen 118 und 119 stellt die Erhöhung der Leitfähigkeit durch die Anwesenheit der Wendepole dar. Es ist $k_w \lambda_{kz}$ die Leitfähigkeit der Zahnkopfstreuung (d. h. der Zahnkopfstreufluß pro Amp. und 1 cm Länge der Nut) unter dem Wendepol. Nach Versuchen von Dr.-Ing. H. Niebuhr[2]) am hiesigen

[1]) Gleichung 199, S. 585, Bd. I bezieht sich nur auf den Fall, daß $2p$ Wendepole angeordnet sind und die Wendepollänge gleich der Ankerlänge ist. Die obigen Gl. 116 und 117 gelten allgemein. (Siehe auch Fußnote S. 288).

[2]) l. c. siehe Fußnote S. 278.

Digitized by Google

E. T. I. tritt bei Anwesenheit von massivem Eisen und kleinem Abstand von Eisen und Leiter oder direkter Berührung stets eine Erhöhung des Zahnkopfstreuflusses ein, d. h. die Erhöhung der Leitfähigkeit des Eigenfeldes überwiegt den Einfluß der Dämpfung. Bei größerem Abstand von Eisen und Leiter ist es umgekehrt und es überwiegt der Einfluß der Dämpfung die Erhöhung der Leitfähigkeit. Diese Erscheinung ist gut aus Fig. 344 zu ersehen, in welcher der Faktor k_w in Abhängigkeit von der Lage der Spule in der Kommutierungszone aufgetragen ist. Für $k_w = 1$ halten sich der Einfluß der Dämpfung und die Erhöhung der Leitfähigkeit das Gleichgewicht. Im allgemeinen kann man für massive Wendepole $k_w \simeq 1{,}2$ setzen.

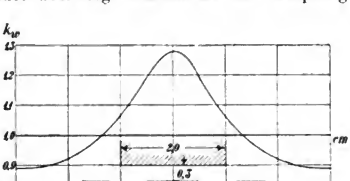


Fig. 344.

Geschieht die Abschaltung des Stromes durch besondere vorgeschobene Bürsten, so berücksichtigt man besser die Bedingung

$$A = \frac{R_w T}{100 \cdot v_k l_B S} > 1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (120)$$

worin

$$S = 0{,}5 \left(\frac{N}{K}\right)^2 l_i k_d \lambda_{L_z} 10^{-8} \text{Henry} \quad . \quad . \quad . \quad (121)$$

und l_B die Länge der abschaltenden Bürste.

Man könnte nach Gl. 120 glauben, daß eine kleine Bürstenlänge l_B anzustreben sei, um A möglichst groß zu machen. Man muß jedoch berücksichtigen, daß die vom zusätzlichen Strome bedingte Stromdichte und Energiedichte ein bestimmtes Maß nicht überschreiten darf.

69. Einige experimentell ermittelte Kommutationskurven.

Um sich Rechenschaft davon zu geben, wie der zeitliche Verlauf der Kurzschlußspannung sich in Wirklichkeit gestaltet, wurde die Potentialdifferenz zwischen zwei den Bürstenkanten parallel liegenden Hilfsbürsten in verschiedenen Zeitmomenten gemessen. Die so gemessenen Werte geben uns nicht die exakten Momentanwerte von Δe, es wäre der Einfluß des Ohm'schen Spannungsabfalles in der Ankerspule und den Zuleitungen zum Kommutator noch zu berücksichtigen. Diese Spannungsabfälle sind jedoch gegenüber den gemessenen Potentialdifferenzen klein, so daß die

Digitized by Google

gemessenen Kurven mit großer Annäherung ein Bild der Änderung von Δe geben. Die Aufnahme geschah mittelst des auf Seite 783, Bd. I beschriebenen Kontaktapparates und an der ebenfalls dort beschriebenen zweipoligen Wendepolmaschine. Die Scheibe des Kontaktgebers ist in 360 Teile eingeteilt, die Bürstenbreite entspricht 12, die Lamellenbreite mit Isolation 8 und die Isolation 0,5 Teilen. Die Bürstenbreite ist somit genau gleich 1,5 Lamellenteilungen. Wenn eine der Hilfsbürsten auf die Lamellenisolation aufläuft, so wird der Meßstromkreis unterbrochen. Diese Unterbrechung erfolgt zweimal während des Durchlaufens einer Lamelle unter der Hilfsbürste, nämlich das eine Mal bei der ablaufenden, das andere Mal bei der auflaufenden Kante. Die Zeit des Durchlaufens einer Lamelle unter der Bürste entspricht einer Periode des Vorganges. Während der einen Hälfte dieser Periode sind zwei Spulen zwischen den Bürstenkanten kurzgeschlossen und während der anderen Hälfte nur eine.

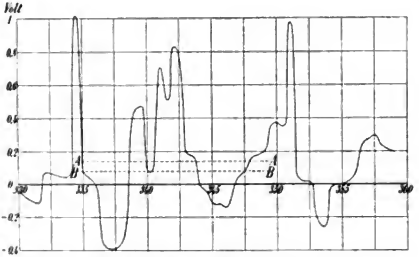


Fig. 345. Δe-Kurve einer Maschine ohne Wendepole.

Fig. 345 zeigt die gemessenen Potentialdifferenzen für den Fall, daß keine Wendepole vorhanden waren. Die Bürste ist um 18,2° aus der geometrisch Neutralen ins Feld verschoben und der Belastungsstrom beträgt 12,5 Amp. Die Momentanwerte sind zum Teil negativ, der Mittelwert bleibt aber positiv. Auffallend groß ist die Verschiedenheit zwischen Maximalwert und Mittelwert. Durch Planimetrierung ergibt sich der Mittelwert ($A—A$) zu 0,138, die direkte Messung mit einem Millivoltmeter ergab nur 0,08 Volt ($B—B$). Die Abweichung erklärt sich durch den Einfluß der Selbstinduktion des Instrumentes, welche bei der außerordentlich hohen Periodenzahl sehr groß ist. Es geht daraus hervor, daß die Messung der mittleren Potentialdifferenz zwischen den Bürstenkanten mit einem Millivoltmeter nicht zuverlässig ist und daß die maximale für die Funken-

Digitized by Google

bildung maßgebende Potentialdifferenz ein Mehrfaches der mittleren sein kann.

Fig. 346 (Kurve *I*) zeigt die Potentialdifferenz zweier benachbarter Lamellen, während sie unter der Bürste durchlaufen. Durch richtige Übereinanderlagerung zweier solcher Kurven läßt sich die Δe-Kurve aus diesen entwickeln. Kurve *II* Fig. 346 stellt die zugehörige Feldkurve bei abgehobenen Bürsten dar.

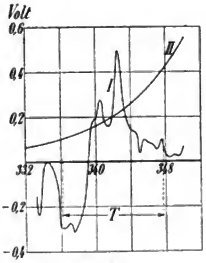


Fig. 346.

Fig. 347 Kurve *I* zeigt die Δe-Kurve bei der Maschine mit Wendepolen. Der Ankerstrom beträgt 13,5 Amp., der Erregerstrom der Wendepole 23 Amp. Die Kurve zeigt einen regelmäßigen Charakter; die Schwankung der Momentanwerte ist geringer und folglich auch die Übereinstimmung zwischen planimetriertem (punktierte Linie) und gemessenem Mittelwert eine gute.

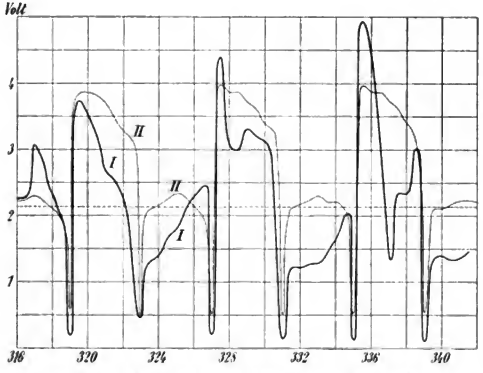


Fig. 347. Δe-Kurve einer Maschine mit Wendepolen.

Die Stellungen, in welchen der Meßstromkreis unterbrochen worden ist, lassen sich aus der Figur gut erkennen. Die Potentialdifferenz geht hier nicht ganz auf Null zurück infolge mangelnder Isolierung und Verunreinigung des Kommutators durch Kohlen- und Metallstaub.

Digitized by Google

Fig. 348 zeigt für die gleichen Verhältnisse die Potentialdifferenz zweier benachbarter Lamellen, während sie unter den Bürsten vorbeilaufen.

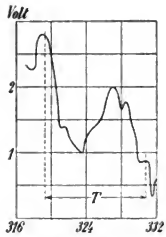


Fig. 348.

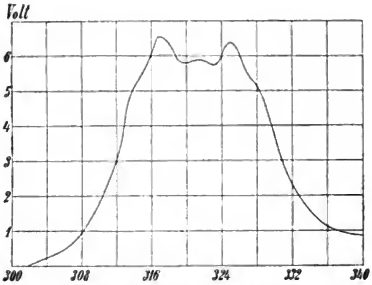


Fig. 349. Feldkurve des Wendepols.

Die Kurve *II* Fig. 347 wurde mit abgehobenen Bürsten aufgenommen. Hierbei wurden die Wendepole mit 17,9 Amp. erregt. Diese Erregung erzeugt allein ungefähr dasselbe Wendefeld, wie die Anker- und Wendeamperewindungen zusammen bei der Aufnahme der Kurve *I*.

Fig. 349 stellt die bei dieser Erregung mit besonderer Prüfspule gemessene Form des Wendefeldes dar.

70. Berechnung der Polschuhform und der Feldkurven.

In den meisten Fällen wird man die Vorausberechnung einer Maschine abschließen, ohne die Polschuhform und die Feldkurven zu berechnen, indem man sich erfahrungsgemäß an bekannte Polformen anlehnt. In manchen Fällen, namentlich wenn die gegebenen Verhältnisse für eine funkenfreie Kommutation ungünstig liegen, ist es jedoch erwünscht, die Form des kommutierenden Feldes genauer zu studieren.

Um die Feldkurven bei Leerlauf und Belastung richtig vorausberechnen zu können, muß die Bürstenstellung vorher bekannt sein. Die Bürstenstellung hängt aber wiederum vom Felde ab, so daß die Feldkurven nur durch schätzungsweises Vorgehen ermittelt werden können. Hierzu kommt noch der Umstand, daß man den Polspitzen die günstigste Form geben will. Die Polspitze ist also auch nicht bekannt und muß zuerst berechnet werden.

Digitized by Google

Die Vorausberechnung einer Polspitze ist ziemlich umständlich, wenn die Spitze stark gesättigt ist, und da eine solche Berechnung außerdem nur eine Annäherung sein kann, so ist sie nur dort zu empfehlen, wo besonderer Wert auf die Form der Polspitze gelegt werden muß.

Man fängt mit der Berechnung des erforderlichen kommutierenden Feldes an. Will man die Bürsten so einstellen, daß die Kurzschlußspannung bei Leerlauf und Vollast gleich ist, so ist das erforderliche kommutierende Feld

$$B_o = \frac{A e_v \cdot 10^6}{S_k \frac{N}{K} l_i v} = AS \left(\frac{t_1 \cdot \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D} + \lambda_{qv} \right) \quad . \quad . \quad (122)$$

Es muß λ_q vorläufig geschätzt werden, und dafür geben die Kurven Fig. 342 und 343 S. 291 gute Anhaltspunkte.

Es wird nun die Form des Polschuhes vorläufig angenommen. Diese muß den angenommenen ideellen Polbogen besitzen und das gewünschte kommutierende Feld liefern. Der Abstand zwischen den Polspitzen eines Poles ist bei nicht gesättigten Spitzen je nach ihrer Abschrägung bis zu 2 cm größer als der ideelle Polbogen und bei gesättigten Spitzen bis zu 3 cm größer.

Ferner macht man zweckmäßig die Abschrägung der Polspitze an der Eintrittseite so groß, daß die Kommutierungszone ein wenig außerhalb des äußersten Teiles der Spitze fällt.

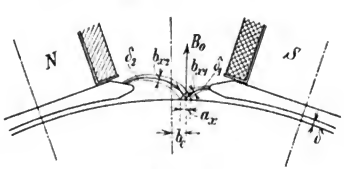


Fig. 350.

Wir werden die richtige Wahl der Polspitze getroffen haben, wenn

$$B_o = \frac{AW_l + AW_z - AW_p}{1{,}6\, a_x} \left(\frac{b_{x1}}{\delta_1} - \frac{b_{x2}}{\delta_2} \right) \quad . \quad . \quad . \quad (123)$$

wo für δ_1, δ_2, a_x und b_x (Fig. 350) die Abmessungen der Kraftröhren, die von den Polen zur Mitte der Kommutierungszone gehen, einzuführen sind.

Gewöhnlich ist δ_2 lang im Verhältnis zu δ_1 und $\frac{b_{x2}}{\delta_2}$ ist gegenüber $\frac{b_{x1}}{\delta_1}$ zu vernachlässigen. Es ist dann δ_1 unmittelbar aus der Formel

Digitized by Google

$$\delta_1 = \frac{AW_l + AW_z - AW_p}{1{,}6\,B_\delta} \cdot \frac{b_{z1}}{a_z} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (124)$$

zu berechnen.

Die Amperewindungen AW_l für den Luftspalt und AW_z für die Zähne sind bekannt. Die Amperewindungen AW_p für die zwei Polspitzen kann man wählen; denn es ist stets möglich, durch richtige Dimensionierung der Polspitze den angenommenen Wert einzuhalten. AW_p wählt man am besten mit Rücksicht auf die quermagnetisierenden Amperewindungen $b_i AS$, und zwar kommt die Sättigung der Polspitze erst recht zur Wirkung, wenn

$$AW_p > 0{,}5\, b_i\, AS.$$

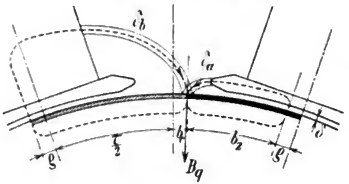


Fig. 351.

An Hand der berechneten Größen δ_1 und b_i und unter Annahme einer 2,5 bis 6 cm langen Abschrägung der Polspitze können wir die vorläufige Polschuhform und für die angenommene Bürstenstellung die Leitfähigkeit λ_q nach Gl. 114, S. 291 berechnen. Es ist (vergl. Fig. 351)

$$\lambda_q = \frac{b_z - \dfrac{AW_p}{2 \cdot AS}}{1{,}6\,\delta_a} + \frac{\tau - b_z}{1{,}6\,\delta_b}.$$

Wenn die in dieser Weise gefundene Leitfähigkeit λ_q nicht mit dem angenommenen Wert übereinstimmt, so muß die Form der Polspitze dementsprechend abgeändert werden. — Ist die Form der unteren Begrenzung der Polspitze festgelegt, so gehen wir zur Berechnung ihrer Stärke über.

Bekannt ist hier die Amperewindungszahl $\frac{1}{2}(AW_l + AW_z)$, die auf jede Kraftröhre zwischen Magnetkern und Ankerkern wirkt. Ferner sind die Amperewindungen $\frac{1}{2} AW_p$ für die Polspitze bekannt. Es wirken somit auf den Teil einer Kraftröhre in der Kommutierungszone, der durch die Luft verläuft, die Amperewindungen

$$\frac{1}{2}(AW_l + AW_z - AW_p).$$

Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß die Amperewindungen für die Polspitze sich gleichmäßig über die Länge derselben ver-

Digitized by Google

teilen, so kennt man auch die MMK, die auf jede zwischen Polspitze und Armaturoberfläche verlaufende Röhre wirkt.

Aus der Übertrittscharakteristik ist jetzt zu bestimmen, wie groß die Induktion an verschiedenen Stellen der Ankeroberfläche ist (s. S. 322, Bd. I), und hieraus kann wieder der Kraftfluß Φ_1, Φ_2, Φ_3 usw. in jedem Querschnitt der Polspitze ermittelt werden. Indem ferner die MMK pro cm Länge der Polspitze gleich $\frac{AW_p}{2\,l_p}$ bekannt ist, so kann die dieser Amperewindungszahl entsprechende Induktion B_p der Magnetisierungskurve des Polschuhmaterials entnommen werden. $Q_1 = \frac{\Phi_1}{B_p}$, $Q_2 = \frac{\Phi_2}{B_p}$, $Q_3 = \frac{\Phi_3}{B_p}$ usw. geben uns die Querschnitte der Polspitze an den verschiedenen Stellen; aus diesen ergeben sich wieder die Stärke und Form der Spitze. Man wird sich aber nicht streng an die durch diese Rechnung erhaltene Form halten, sondern dieselbe mit Bezug auf die Herstellung des Polschuhes etwas abändern. Doch darf die Gesamtzahl der Amperewindungen $\frac{1}{2}AW_p$ sich nur wenig ändern. Man wählt die Begrenzungslinien möglichst geradlinig.

Mit guter Annäherung kann man die Form des Polschuhes auch in folgender einfacheren Weise festlegen.

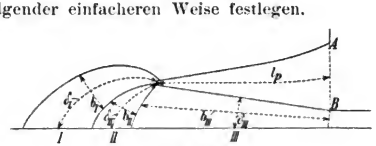


Fig. 352.

Man wählt das Verhältnis $\frac{AW_p}{b_i\,AS}$ und bestimmt zunächst die Größe des Kraftflusses, welcher aus der Polspitze tritt. In Fig. 352 ist dieser Kraftfluß gleich den Kraftflüssen der Röhren *I* und *II*. Die Leitfähigkeit dieser Röhren pro cm Ankerlänge ist bezw. $\lambda_I = 1{,}25\,\frac{b_I}{\delta_I}$ und $\lambda_{II} = 1{,}25\,\frac{b_{II}}{\delta_{II}}$ und somit

$$\Phi_I + \Phi_{II} = \frac{AW_1 + AW_2 - AW_p}{2}(\lambda_I + \lambda_{II})l_i.$$

Weiter bestimmen wir den Kraftfluß durch das Rohr *III*, indem wir[1])

$$\delta_{III} = \frac{2\delta + \delta_1}{3} \cdot \frac{k_1 + k_2}{2}$$

[1]) δ_1 = Länge der Begrenzungslinie der linken Seite der Kraftröhre b_{III}.

Digitized by Google

und

$$\lambda_{III} = 7{,}5 \frac{b_{III}}{(2\delta + \delta_1)(k_1 + k_2)}$$

setzen. Der Kraftfluß durch das Rohr *III* wird dann

$$\Phi_{III} = 3{,}75 \frac{AW_1 + AW_2 - \frac{1}{2} AW_p}{(2\delta + \delta_1)(k_1 + k_2)} b_{III} l_1 . \quad . \quad . \quad (125)$$

indem wir die mittlere auf dieses Rohr wirkende MMK gleich

$$\frac{AW_1 + AW_2 - \frac{1}{2} AW_p}{2}$$

setzen.

Der totale Kraftfluß durch den Querschnitt AB ist gleich $\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III}$ und da $aw_p = \frac{AW_p}{2 l_p}$ und somit auch B_p bekannt ist, finden wir den Querschnitt AB gleich $\frac{\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III}}{B_p}$.

Über die Gestalt, welche der oberen Begrenzung zu geben ist, gibt Fig. 353 Aufschluß. In dieser Figur sind die Polschuhformen für verschiedene Polschuhsättigungen aufgezeichnet, und zwar ist das Verhältnis $\frac{AW_p}{b_i \cdot AS}$ bezw. 1, 0,75, 0,5 und 0,25.

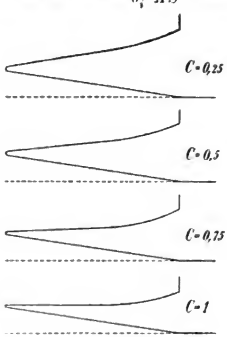


Fig. 353.

Die Berechnung dieser Formen wurde nach der oben beschriebenen genaueren Methode durchgeführt, und zwar unter folgenden Voraussetzungen: $B_1 = 8500$; $B_2 = 20000$ (im Mittel): $\delta = 0{,}5$ cm; $k_1 = 1{,}22$; $AW_1 + AW_2 = 10340$; $b_i AS = 6900$. Die Größen entsprechen Verhältnissen, wie sie bei größeren normalen Maschinen gebräuchlich sind. Bei starken Sättigungen werden die Querschnitte des Polschuhes klein, und es ist in diesem Falle zu empfehlen, einen Teil der Bleche wegzulassen. Wird die Hälfte der Bleche weggelassen, so ist die Höhe jedes Polschuhquerschnittes doppelt so groß zu machen.

Ist die Form des Polschuhes festgelegt, so kann die Feldkurve bei Leerlauf aufgezeichnet werden. Die Feldkurve verläuft über den Polbogen b fast horizontal; unter den Polspitzen fällt sie langsam ab.

Digitized by Google

Bei der Berechnung der Feldkurve bei Belastung geht man in der Weise vor, daß man die neutrale Zone des Zusatzfeldes (den Wert ϱ) schätzt, welches über das Feld bei Leerlauf superponiert werden muß, um das Feld bei Belastung zu erhalten. Mit Hilfe der Übertrittcharakteristiken für die Mitte des Polschuhes und für die beiden Polspitzen kann nach dem im Abschnitt 89, Bd. I gezeigten Verfahren die Feldstärke in jedem Punkte ermittelt werden, und man kann durch Ausmessung der Fläche dieser Kurve zwischen den Bürsten die Größe des Kraftflusses Φ_b bei Belastung nachprüfen. Stimmt sie nicht mit der gewünschten überein, so muß die neutrale Zone anders gewählt werden. — Hat man zuletzt die richtige Feldkurve bei Belastung erhalten, so ergibt sich der genaue Wert für die Leitfähigkeit λ_q zu

$$\lambda_q = \frac{B_q}{2\,AS},$$

wo B_q die Stärke des Zusatzfeldes in der Kommutierungszone bedeutet. Stimmt dieser aus den Feldkurven genau ermittelte Wert von λ_q nicht ganz mit dem angenommenen überein, so kann die Bürste ein wenig verschoben werden, bis die Feldstärke B_o in der Kommutierungszone genau mit dem Wert

$$AS\cdot\left(\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} + \lambda_q\right)$$

übereinstimmt, welcher der Leitfähigkeit λ_q der Bürstenlage entspricht.

Ist das erreicht, so kennen wir die Form des Polschuhes wie die Lage der Bürsten und können die Amperewindungen AW_k pro Kreis nachprüfen.

Digitized by Google

Fünfzehntes Kapitel.

Festigkeitsberechnungen.

71. Festigkeit des Konstruktionsmaterials. — 72. Beanspruchung durch die Fliehkraft. — 73. Beanspruchung der verschiedenen Konstruktionsteile.

71. Festigkeit des Konstruktionsmaterials.

Als Konstruktionsmaterial gebraucht man bei normalen Maschinen hauptsächlich Gußeisen, Stahlguß, Flußeisen und Flußstahl.

Für den Ankerkörper und die Kommutatorbüchse kommt vorwiegend Gußeisen oder Stahlguß in Frage, während Flußeisen und Stahl für Bolzen und derartige Verbindungselemente gebraucht wird.

Bei raschlaufenden Maschinen wird viel Gebrauch von Bronzesorten hoher Zugfestigkeit gemacht. Diese Bronzen können gleich hoch wie Stahlguß beansprucht werden, sind jedoch zuverlässiger und können in komplizierteren Formen hergestellt werden, während es zu empfehlen ist, Stahlgußteilen eine möglichst einfache Form zu geben.

Außerdem ist man bei verschiedenen Konstruktionsteilen, wie z. B. bei den Wicklungskappen, schon deshalb auf Bronze angewiesen, weil ein magnetisches Material hier nicht zu empfehlen ist.

Die Bronzen sind bedeutend teuerer als Stahlguß (Deltametall z. B. etwa 5mal).

Für Drahtbänder kommen verschiedene Drahtsorten aus Stahl oder Bronze in Frage. Nachstehende Tabelle gibt die Zugfestigkeit für die genannten Materialien.[1])

Material	Zugfestigkeit in kg/cm²
Gußeisen	1200—1800
Flußeisen	3400—4400
Stahlguß	3500—7000
Flußstahl	4500—10000

[1]) Nach „Hütte".

Digitized by Google

Material	Zugfestigkeit in kg/cm²
Rotguß	2000
Geschützbronze	3200
Phosphorbronze	4600
Deltametall	3400—5800
Tiegelflußstahldraht	9000—19000
Bessemerstahldraht (blank)	6500
„ (geglüht)	4000—6000
Bronzedraht	4600—7100
Höpermetalldraht (blank)	14000
„ (geglüht)	6300
Deltametalldraht	bis 9800
Messingdraht	5000
Siliziumbronzedraht	6500—8500

72. Beanspruchung durch die Fliehkraft.

Die Fliehkräfte nehmen bei raschlaufenden Maschinen sehr große Werte an, und es ist deshalb nötig, die Beanspruchung der betreffenden Konstruktionsteile nachzuprüfen.

Bezeichnen wir mit:

r den Abstand der betrachteten Masse vom Drehmittelpunkt in cm,

G das Gewicht der rotierenden Masse in kg,

so ergibt sich die Fliehkraft zu

$$C = G\,r\left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (126)$$

Man sieht hieraus, daß bei raschlaufenden Maschinen die Fliehkraft schon bei kleinem Gewichte G sehr groß werden kann. So ist bei 3000 Touren die Fliehkraft, die durch ein Gewicht von 1 kg in einem Abstand von 1 cm vom Drehpunkt hervorgerufen wird, gleich 100 kg.

Ist die rotierende Masse gleichmäßig am Umfang eines Zylinders verteilt und wird die Fliehkraft durch einen Ring, dessen Dicke im Verhältnis zum Durchmesser klein ist, aufgenommen, so ruft die betrachtete Masse in dem Ring eine Beanspruchung

$$\sigma = \frac{C}{2\pi F} \text{kg/cm}^2 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (127)$$

hervor, gleichgültig, ob die Fliehkraft den Ring von außen zieht

Digitized by Google

oder von innen gegen den Ring drückt. Es ist F der Querschnitt des Ringes in cm² und C entspricht der Gl. 126.

Wird ein ringförmiger Körper von geringer Dicke nur durch die Fliehkraft seiner eigenen Masse beansprucht, so geht die Gleichung, wenn wir für C seinen Wert (nach Gl. 126) und das Gewicht $G = 2\pi r F \gamma \cdot 10^{-3}$ kg setzen, in die nachfolgende Gleichung über:

$$\sigma = 0{,}01\, \gamma v^2 \text{ kg/cm}^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (128)$$

Es ist γ das spezifische Gewicht des rotierenden Körpers und v die Umfangsgeschwindigkeit in m/sek.

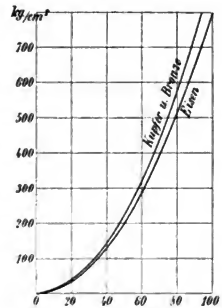


Fig. 354.

Wir sehen hieraus, daß bei einem ringförmigen Körper die Beanspruchung durch die Fliehkraft seiner eigenen Masse für ein bestimmtes Material nur von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig ist.

Für Eisen können wir $\gamma \simeq 8$, für Kupfer und Bronze $\gamma \simeq 9$ setzen. Tragen wir die Beanspruchung nach Gl. 128 in Abhängigkeit von v auf, so erhalten wir Fig. 354.

Hat der Ring eine Dicke, welche im Verhältnis zum Durchmesser bedeutend ist, so erhalten wir als genaue Formel für die maximale Beanspruchung durch die Fliehkraft der Eigenmasse

$$\sigma_{max} = 0{,}01\, \gamma v^2 \left\{0{,}82 + 0{,}18 \left(\frac{D_i}{D_a}\right)^2\right\} \text{ kg/cm}^2, \quad . \quad (129)$$

worin D_a und D_i bezw. der äußere und der innere Durchmesser des Ringes sind. Diese maximale Beanspruchung tritt am inneren Umfang des Ringes auf. Für $D_a = D_i$ geht diese Gleichung in die Gl. 128 über, während wir für $D_i = 0$, d. h. für eine volle Scheibe

$$\sigma_{max} = 0{,}01 \cdot 0{,}82 \cdot \gamma v^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (130)$$

erhalten. Im allgemeinen wird somit die maximale Beanspruchung nicht viel von dem Wert nach Gl. 128 abweichen, und wir können uns deshalb in allen Fällen, in welchen es sich um einen ringförmigen Körper handelt, der Gl. 128 bedienen.

Wird ein ringförmiger Körper, dessen Dicke im Verhältnis zum Durchmesser bedeutend ist, durch die am äußeren Umfang wirkende Fliehkraft einer gleichmäßig verteilten Masse beansprucht,

Digitized by Google

so ist die hierdurch hervorgerufene maximale Beanspruchung des Ringes

$$\sigma_{max} = \frac{C}{2\pi F} \frac{2}{1 + \frac{D_i}{D_a}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (131)$$

Diese maximale Beanspruchung tritt am inneren Umfang auf. Für $D_a = D_i$ geht die Gl. 131 in die Gl. 127 über. Für $D_i = 0$, d. h. für eine volle Scheibe wird

$$\sigma_{max} = 2 \frac{C}{2\pi F} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (132)$$

und somit zweimal so groß als die Berechnung nach Formel 127 ergeben würde.

Es ist somit zweckmäßig, sich der Formel 131 zu bedienen, welche für einen ringförmigen Körper allgemeine Gültigkeit hat.

Wir wollen jetzt die Konstruktionsteile einzeln betrachten.

73. Beanspruchung der verschiedenen Konstruktionsteile.

Ankerkörper. Beanspruchung durch die Fliehkraft des Eigengewichtes $= 0{,}08\, v^2$. Beanspruchung durch die Fliehkraft des Ankerkupfers (Gewicht G_{ka}) und der Zähne (Gewicht G_z)

$$= \frac{(G_z + G_{ka})\, D}{4 \cdot \pi\, k_2\, l\, h} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \frac{2}{1 + \frac{D_i}{D_a}} \text{ kg/cm}^2.$$

Die gesamte Beanspruchung

$$\sigma = 0{,}08\, v^2 + \frac{(G_z + G_{ka})\, D}{4 \cdot \pi\, k_2\, l\, h} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \frac{2}{1 + \frac{D_i}{D_a}} \text{ kg/cm}^2 . \quad (133)$$

Wird die Wicklung durch Keile gehalten, so beansprucht das Gewicht des ganzen Ankerkupfers den Ankerkörper. Werden dagegen die Stirnverbindungen durch Bandagen oder Metallkappen gegen die Fliehkraft gesichert, so ist in Gl. 133 nur das Gewicht des eingebetteten Kupfers einzusetzen. Wird die Wicklung ganz durch Bandagen gehalten, so nehmen diese die ganze Fliehkraft der Wicklung auf und es ist in Gl. 133 $G_{ka} = 0$ zu setzen.

Zähne. Der Zahnfuß wird beansprucht durch die Fliehkraft der Zähne und des Ankerkupfers. Die Beanspruchung ergibt sich zu

$$\sigma = \frac{(G_z + G_{ka})\, D}{2 \cdot Z\, z_2\, k_2\, l} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{ kg/cm}^2 . \quad . \quad . \quad (134)$$

Digitized by Google

Je nachdem die Bandagen die ganze Wicklung oder nur die Stirnverbindungen halten oder gar keine Bandagen vorhanden sind, ist für G_{ka} Null, das Gewicht des eingebetteten Kupfers oder das Gewicht des gesamten Ankerkupfers einzusetzen.

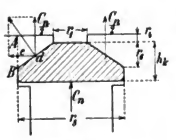


Fig. 355.

Wird die Ankerwicklung durch Keile gegen die Wirkung der Fliehkraft gesichert, so wird der Zahnquerschnitt AB (Fig. 355) auf Biegung und Scherung beansprucht. Die durch das Kupfergewicht einer Nut hervorgerufene Fliehkraft ist

$$C_n = \frac{G_{ka} D}{Z \cdot 2} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (135)$$

Die abscherende Kraft im Querschnitt AB ist $\frac{C_n}{2}$ und das Biegungsmoment

$$M = \frac{C_n}{2} \cdot \overline{cd} = C_n \frac{r_8 - r_1}{8} \text{ kg cm} \quad . \quad . \quad . \quad (136)$$

Je nachdem die Keile die Fliehkraft des ganzen Kupfers oder nur des eingebetteten Kupfers aufnehmen, ist für G_{ka} das gesamte Kupfergewicht oder das Gewicht des eingebetteten Kupfers einzusetzen.

Das Widerstandsmoment des Querschnitts $\overline{AB}$ ist gleich

$$W = \frac{1}{6} \cdot k_2 \cdot l \cdot \overline{AB}^2 = \frac{1}{6} \cdot k_2 \, l \, (r_4 + r_6)^2 \text{ cm}^3 .$$

Es wird somit die Biegungsbeanspruchung

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot C_n (r_8 - r_1)}{8 \cdot k_2 \cdot l \, (r_4 + r_6)^2} \text{ kg/cm}^2 . \quad . \quad . \quad (137)$$

die Schubbeanspruchung

$$\tau = \frac{C_n}{2 \cdot k_2 \, l \, (r_4 + r_6)} \text{ kg/cm}^2 . \quad . \quad . \quad . \quad (138)$$

und man findet die totale Beanspruchung

$$\sigma = 0{,}35 \, \sigma_b + 0{,}65 \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \, (\alpha_o \tau)^2} \text{ kg/cm}^2 \quad . \quad (139)$$

Es ist

$$\alpha_o = \frac{\text{zulässige Biegungsbeanspruchung}}{1{,}3 \times \text{zulässige Schubbeanspruchung}} \quad . \quad . \quad (140)$$

und kann für Blech etwa gleich 1,1 genommen werden.

Digitized by Google

Keile (siehe Fig. 355). Das maximale Biegungsmoment des Keiles ist gleich:

$$M = C_n \frac{r_1 + r_8}{8} \text{ kg cm.}$$

Es hat C_n den Wert nach Gl. 135.

Ist h_k die Dicke des Keiles und nimmt man an, daß der Keil über eine Länge l_1 aufliegt, so ist das Widerstandsmoment

$$W = \frac{1}{6} l_1 h_k^2$$

und die maximale Beanspruchung des Keiles

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot C_n (r_1 + r_8)}{8 \cdot l_1 h_k^2} \text{ kg/cm}^2 \quad . \quad . \quad . \quad (141)$$

Für Holzkeile geht man mit der Beanspruchung bis etwa 60 kg/cm².

Drahtbänder. Die Beanspruchung der Bandagen ergibt sich zu:

$$\sigma = 0{,}01\, \gamma v^2 + \frac{G_{ka} D}{4 \cdot \pi F_B} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{ kg/cm}^2 \quad . \quad . \quad (142)$$

Das spezifische Gewicht γ ist für Stahldraht = 8 und für Bronzedraht = 9 zu setzen. Es ist F_B der Querschnitt sämtlicher Bandagen.

Je nachdem die Bandagen die ganze Wicklung oder nur die Stirnverbindungen festhalten, ist für G_{ka} das totale Gewicht des Ankerkupfers oder nur das Gewicht der Stirnverbindungen einzusetzen.

Wicklungskappen. Die Beanspruchung ergibt sich für Bronzekappen zu

$$\sigma = 0{,}09 \cdot v^2 + \frac{G_{ka} D}{4 \pi F_k} \left(\frac{n}{300}\right)^2 . \quad . \quad . \quad . \quad (143)$$

Es ist F_k der Querschnitt der Kappen und G_{ka} das Gewicht der Stirnverbindungen.

Kommutatorlamellen. Die Fliehkraft einer Kommutatorlamelle ist gleich

$$C_l = \frac{G_{kk}}{K} \cdot \frac{D_k}{2} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{ kg} . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (144)$$

worin G_{kk} das totale Gewicht des Kommutatorkupfers ist. Sind die Lamellen nur an den beiden Enden befestigt, so ist das maximale Biegungsmoment einer Lamelle

$$M = C_l \cdot \frac{l_k}{8} \text{ kg cm.}$$

Digitized by Google

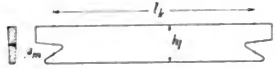


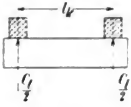
Fig. 356.

Ist β_m die mittlere Dicke einer Lamelle und h_l ihre Höhe, so ist das Widerstandsmoment einer Lamelle

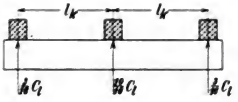
$$W = \frac{1}{6} \cdot \beta_m h_l^2 \text{ cm}^3$$

und die maximale Biegungsbeanspruchung

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \text{ kg/cm}^2.$$

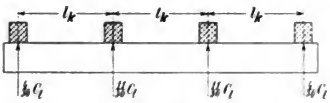


$$M_{max} = \frac{C_l l_k}{8} \text{ kg cm}$$



$$M_{max} = \frac{C_l l_k}{16} \text{ kg cm}$$

Für den Fall, daß der Kommutator durch 2, 3 oder 4 Schrumpfringe zusammengehalten wird, geben die Fig. 357 die maximalen Momente an, sowie den Teil der Fliehkraft einer Lamelle, welcher auf jeden Ring ausgeübt wird.



$$M_{max} = \frac{C_l l_k}{30} \text{ kg cm.}$$

Fig. 357.

Die Beanspruchung ergibt sich hier wieder zu

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \text{ kg/cm}^2.$$

Schrumpfringe. Bei schnell laufenden Maschinen werden auf den Kommutator Schrumpfringe aufgezogen.

Fig. 358a stellt den Schrumpfring vor dem Aufziehen und Fig. 358b den auf den Kommutator aufgezogenen Schrumpfring dar. Der Radius des Kommutators ist nach dem Aufziehen des Ringes um b cm kleiner geworden, während der innere Radius des Ringes um a cm größer geworden ist. In Fig. 358

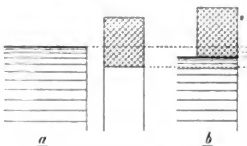


Fig. 358. a und b.

Digitized by Google

sind die Stücke a und b der Deutlichkeit halber unverhältnismäßig groß gezeichnet.

Nach dem Aufziehen besteht in den Lamellen eine Druckspannung, während der Ring auf Zug beansprucht ist.

Wir wollen diese Zugbeanspruchung im Ring mit σ_o bezeichnen. Dehnt sich bei der Rotation der Ring infolge der Fliehkraft so weit, bis sein Innendurchmesser gleich D_x geworden ist, so ist die Beanspruchung des Ringes, da sie der Dehnung proportional ist,

$$\sigma = \sigma_o \frac{a + x}{a}.$$

Tragen wir die Beanspruchung des Ringes in Abhängigkeit der Dehnung x auf, so erhalten wir die Gerade AB in Fig. 359.

Bei der Dehnung des Ringes wird die Druckbeanspruchung der Lamellen kleiner, und wenn x gleich b geworden ist, hat der Kommutatordurchmesser denjenigen Wert, den er vor dem Aufziehen des Ringes hatte und die Druckbeanspruchung der Lamellen ist gleich Null geworden. Die Lamellen üben dann auf den Ring nur einen Druck durch ihre Fliehkraft aus.

Tragen wir den Gegendruck, welchen die Lamellen auf den Ring ausüben, in Abhängigkeit der Dehnung x auf, so erhalten wir die Gerade CD.

Die Differenz der durch die Gerade AB gegebenen totalen Spannungen und der durch den Aufziehungsdruck hervorgerufenen Spannungen geben uns die durch die Fliehkraft hervorgerufenen Spannungen in Abhängigkeit der Dehnung. Diese werden durch die Gerade OE dargestellt.[1])

Es ist schwierig a und b zu bestimmen. Nehmen wir an, der Kommutator, der aus vielen Lamellen mit zwischenliegendem Isoliermaterial besteht, sei nicht elastisch, so dürfen wir $b = 0$ setzen, was zwar nur annähernd zutreffen wird.

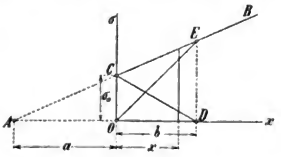


Fig. 359.

Es fällt dann in Fig. 359 D mit O und E mit C zusammen, d. h. der Ring beginnt sich erst dann zu dehnen, wenn die durch die Fliehkräfte hervorgerufene Spannung größer ist als die durch das Aufziehen des Ringes in diesem erzeugte Spannung. Die

[1]) Zu ähnlichen Ergebnissen kommt R. Livingstone im „Electrician", Vol. LVII, S. 207.

Digitized by Google

letztere müßte daher größer sein als die erstere, dann kann eine weitere Dehnung des Ringes nicht mehr eintreten und die Lamellen können sich nicht lösen.

Die Beanspruchung durch die Fliehkraft der eigenen Massen und des Kommutatorkupfers ist pro Ring gleich

$$\sigma = 0{,}08\, v^2 + \alpha \frac{G_{kk} D_k}{4 \cdot \pi F_K} \left(\frac{n}{300}\right)^2 \text{kg/cm}^2 \quad . \quad . \quad (145)$$

wenn F_K der Querschnitt eines Ringes ist. Es stellt α den Teil der gesamten Fliehkraft des Kommutatorkupfers dar, welcher von dem betrachteten Ring aufgenommen wird. Die Werte von α ergeben sich aus Fig. 357. Bei 2 Schrumpfringen ist $\alpha = \frac{1}{2}$; bei 3 Schrumpfringen ist α für die äußeren Ringe gleich $\frac{3}{16}$ und für den mittleren Ring gleich $\frac{10}{16}$; bei 4 gleichmäßig verteilten Schrumpfringen ist α für die äußeren Ringe gleich $\frac{4}{30}$ und für die mittleren gleich $\frac{11}{30}$.

Ist der Radius des Ringes nach dem Aufziehen um a cm größer geworden, so ist die hierdurch hervorgerufene Beanspruchung des Ringes

$$\sigma_0 = E \frac{2a}{D_k} \text{ kg/cm}^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (146)$$

Der Elastizitätsmodul E ist etwa gleich 2000000.

Nehmen wir als zulässige Beanspruchung des Ringes 800 kg/cm², so wird

$$a = 2 \cdot D_k \, 10^{-4}.$$

Da jedoch der Kommutator beim Aufziehen des Ringes nachgibt, so werden brauchbare Werte nur durch Erfahrung erhalten werden können.

Die Speichen des Ankersterns. Die Speichen oder Arme des Ankersternes werden durch die am Umfange des Ankers wirkenden Kräfte auf Biegung beansprucht. Ist L die Länge einer Speiche in cm, vom Mittelpunkt der Welle aus gemessen, und A die Anzahl der Speichen, n die Tourenzahl des Ankers und PS die Zahl der verbrauchten oder geleisteten Pferdestärken, so ist die Kraft K, welche die Speiche auf Biegung beansprucht

$$K = 71620 \frac{PS}{A\, n\, L} \text{ kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (147)$$

Digitized by Google

Ist ferner l die Länge der Speiche bis zur Nabe, oder allgemein die Länge des Hebelarmes, welche für die Biegung in Betracht kommt, W das Widerstandsmoment des Speichenquerschnittes und σ_b die zulässige Beanspruchung des Materials auf Biegung in kg/cm², so folgt

$$Kl = W\sigma_b.$$

Mit Rücksicht auf plötzliche Belastungen oder große Überlastungen, wie im Falle eines Kurzschlusses, sowie mit Rücksicht auf die Herstellung, wird der Speichenquerschnitt so groß gewählt, daß die Beanspruchung σ_b klein ausfällt.

Für Gußeisen soll

$$\sigma_b \leqq 50 \text{ bis } 100 \text{ kg}$$

und für Messingguß

$$\sigma_b \leqq 100 \text{ bis } 150 \text{ kg}$$

sein.

Digitized by Google

Sechzehntes Kapitel.

Berechnungsbeispiele.

74. Ausführliche Berechnung eines Doppelschlußgenerators, 500 KW, 100 Umdr. pro Min. — 75. Nachrechnung eines Doppelschlußgenerators mit Wendepolen, 650 KW, 100 Umdr. pro Min. — 76. Berechnung eines Wendepolmotors 15 PS, 200—1200 Umdr. pro Min. — 77. Berechnung eines Hauptstromgenerators, 600 KW, 300 Umdr. pro Min.

74. Ausführliche Berechnung eines Doppelschlußgenerators, 500 KW, 100 Umdr. pro Min.

Aufgabe. Es ist ein Straßenbahngenerator für 500 KW bei 100 Umdrehungen pro Minute und 550 Volt Spannung zu berechnen. Die Maschine soll für konstante Klemmenspannung kompoundiert werden und von Leerlauf bis $^3/_4$ Belastung (625 KW) ohne Bürstenverstellung funkenfrei laufen. Die Wicklung ist mit Äquipotentialverbindungen zu versehen. Der Wirkungsgrad soll mindestens bei Vollast 92 % und bei Halblast 90 % betragen. Die Temperaturerhöhung von Anker und Kommutator darf 45° C und die aus der Widerstandszunahme berechnete Temperaturerhöhung der Magnetspulen 60° nicht überschreiten.

Für die Bestimmung der Hauptdimensionen der Maschine gehen wir von Formel 10 aus:

$$\frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS} = \frac{D^2 l_i n}{KW}$$

Wählen wir vorderhand: $\alpha_i = 0{,}7$

$$B_l = 9000$$

$$AS = 240,$$

so wird:

$$\frac{D_2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{0{,}7 \cdot 9000 \cdot 240} = 39{,}8 \cdot 10^4$$

(Siehe Fig. 312 Seite 234.)

Digitized by Google

Hieraus folgt:

$$D^2 l_i = \frac{39{,}8 \cdot 10^4 \cdot 500}{100} = 199 \times 10^4.$$

Indem wir für l_i oder D verschiedene Werte annehmen und eine Polzahl $2p$ wählen, lassen sich die Werte der folgenden Tabelle berechnen.

Tabelle II.

l_i	D	$2p$	$\tau = \frac{\pi D}{2p}$	$b_i = \alpha_i \tau$	l_i/b_i	v	$\frac{J}{2a} = i_a$	a	p/a
25	276	16	54,2	37,9	0,66	14,4	114	4	2
28	260	16	51	35,7	0,785	13,6	114	4	2
30	251	14	56,3	39,2	0,765	13,1	114	4	$^7/_4$
32	245	12	64	44,8	0,71	12,8	114	4	$^6/_4$
35	234	12	61,3	42,8	0,77	12,25	154	3	2
37	227	10	71,3	49,8	0,74	11,9	114	4	$^5/_4$
40	220	10	69	48,3	0,83	11,5	91	5	1
45	206	8	81	56,6	0,8	10,8	114	4	1

Wir legen der weiteren Berechnung die zwölfpolige Anordnung zugrunde und nehmen $a = 3$ an; wir erhalten dann symmetrische Äquipotentialverbindungen, da p/a ganzzahlig ist.

Wir wählen:

$$l_i = 35 \text{ cm}, \quad D = 240 \text{ cm}, \quad v = 12{,}5 \text{ m/sec}, \quad p = 6, \quad a = 3.$$

Dann ist:

$$\frac{D^2 l_i n}{K W} = \frac{240^2 \cdot 35 \cdot 100}{500} = 40{,}5 \cdot 10^4.$$

Die Stabzahl erhält man:

$$N = \frac{\pi D A S}{i_a} = \frac{3{,}14 \cdot 240 \cdot 230}{154} \simeq 1130.$$

Die Stabzahl N muß derart gewählt werden, daß sie in der Nähe von 1130 liegt und der Wicklungsformel genügt. Ferner sollen in jeder Nut $u_n = 4$ Stäbe untergebracht werden.

Wie aus der Tabelle Seite 187, Bd. I, zu ersehen ist, ist es für die Wicklungsverhältnisse $p = 6$, $a = 3$ und $u_n = 4$ nicht möglich, ohne Vermehrung der Nutenzahl und Zufügen toter Stäbe $\frac{Z}{a}$ gleich einer ganzen Zahl zu machen. Es sind $2a = 6$ tote Stäbe hinzuzufügen.

Digitized by Google

Durch einiges Ausprobieren ergibt sich

$$N = 1218; \quad AS = 248.$$

Man erhält:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s + 2a}{p} = \frac{1218 - 6}{6} = 202$$

$$y_1 = y_2 = 101$$

$$y_1 = y_n u_n + 1 = 25 \cdot 4 + 1.$$

Pro Wicklungselement müssen wir 2 Stäbe rechnen, es wird dann die Lamellenzahl:

$$K = \frac{s}{2} = \frac{1218}{2} = 609$$

und $\frac{K}{a} = 203$ eine ganze Zahl.

$$y_k = \frac{y_1 + y_2}{2} = 101.$$

y_k und a sind teilerfremd; die Wicklung ist somit einfach geschlossen.

Wenn wir eine Stromdichte $s_a = 3{,}0$ Amp/mm² annehmen, so wird der Querschnitt eines Ankerstabes q_a:

$$q_a = \frac{i_a}{s_a} = \frac{154}{3{,}0} \simeq 51 \text{ mm}^2.$$

Die Nutenzahl wird

$$Z = \frac{1218 + 6}{4} = 306.$$

Der Kraftfluß pro Pol bei Belastung kann jetzt unter Annahme eines bestimmten Spannungsabfalles im Anker und in der Hauptschlußwicklung gerechnet werden. Nehmen wir diesen Spannungsabfall gleich 4 %, so muß die induzierte EMK $E_a = 572$ Volt sein und es wird

$$\Phi_b = E_a \frac{a}{N} \frac{60}{pn} 10^8 = \frac{572 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 10^8}{1218 \cdot 6 \cdot 100} = 14{,}1 \cdot 10^6$$

und die Luftinduktion bei Belastung

$$B_l = \frac{\Phi_b}{l_i b_i} = \frac{14{,}1 \cdot 10^6}{35 \cdot 44} = 9160.$$

Nehmen wir im Anker 3 Luftschlitze zu 1 cm an, so wird für die erste Annäherung

$$l = l_i - \frac{2}{3} n_s b_s = 35 - \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot 1 = 33$$

und $l_1 = 33 + 3 = 36$.

Digitized by Google

Die Zahnteilung t_1 am Zahnkopfe ist:

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{3{,}14 \cdot 240}{306} = \mathbf{24{,}6\ mm.}$$

Als maximale Zahninduktion wählen wir $B_{zi\,max} = 22500$, ferner sei die Dicke des Eisenblechs: $\Delta = 0{,}5$ mm, die Isolation zwischen den Blechen $10\,\%$ oder $k_2 = 0{,}9$.

Nun ist:

$$z_2 = \frac{t_1 B_i l_i}{k_2 B_{zi\,max} l} = \frac{24{,}6 \cdot 9160 \cdot 35}{0{,}9 \cdot 22500 \cdot 33} = 11{,}8\ \text{mm}.$$

Wir schätzen die Nutentiefe zu 4 cm und erhalten alsdann für die Zahnteilung am Fuß:

$$t_2 = \frac{\pi\,(240 - 8)}{306} = 23{,}8\ \text{mm}.$$

Die Nutenweite ist somit:

$$t_2 - z_2 = 23{,}8 - 11{,}8 = 12\ \text{mm}.$$

Nehmen wir für Isolation und Spielraum einen Zuschlag von 4,4 mm quer über die Nut gemessen (s. Tabelle S. 31), so bleiben für die gesamte Kupferbreite

$$12 - 4{,}4 = 7{,}6\ \text{mm},$$

und die Breite eines Stabes wird: $\frac{7{,}6}{2} = 3{,}8$ mm und die Stabhöhe $\frac{51}{3{,}8} \simeq 13$ mm.

Wenn man mit der Rechnung an diesem Punkt angelangt ist, so wird man gewöhnlich für die Nutenform und den Stabquerschnitt noch nicht ganz passende Werte finden. Man muß dann die gemachten Annahmen und die gefundenen Dimensionen derart ändern, daß Nutenform, Stabquerschnitt und Zahnsättigung passend ausfallen.

Ist die Dicke der Stabisolation einseitig 0,4 mm, so ergeben sich die endgültigen Stabdimensionen zu $3{,}8 \times 13$ mm nackt und $4{,}6 \times 13{,}8$ mm isoliert.

Es wird also:

$$q_a = \mathbf{49\ mm^2}$$

$$s_a = \frac{154}{49} = \mathbf{3{,}15\ Amp./mm^2}.$$

Die genauen Abmessungen der keilverschlossenen Nut werden jetzt wie folgt (vergl. Fig. 360):

Digitized by Google

Nutenweite: $b_n = 1{,}20 + 0{,}8 + 2 \cdot 3{,}8 + 0{,}8 + 0{,}4 + 1{,}20 = \mathbf{12\,mm}$

Nutenhöhe: $h_n = 1{,}20 + 0{,}8 + 13 + 1{,}20 + 0{,}8 + 1{,}20 + 0{,}8 + 13 + 1{,}20 + 0{,}8 + 7 = 2 \cdot 13 + 15 =$ **41 mm** (d. h. Nutenhöhe = Kupferhöhe + 15 mm).

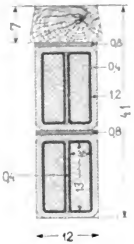


Fig. 360.

Der Nutenfüllfaktor ist:

$$f_n = \frac{4 \cdot 49}{12 \cdot 41} = \frac{196}{492} = \mathbf{0{,}40.}$$

Die Zahndicken am Kopf bezw. Fuß sind:

$$z_1 = 24{,}6 - 12 = \mathbf{12{,}6\,mm}$$

$$z_2 = 23{,}8 - 12 = \mathbf{11{,}8}\ \text{„}$$

$$z_m = \frac{12{,}6 + 11{,}8}{2} = \mathbf{12{,}2}\ \text{„}\ \text{(mittl. Zahndicke).}$$

Die Wicklung soll mit Äquipotentialverbindungen versehen werden.

Da $\frac{p}{a}$ eine ganze Zahl ist, so werden die Potentialschritte gleich, und zwar

$$y_p = \frac{K}{a} = \frac{609}{3} = 203.$$

Schließen wir beim Durchlaufen des Schemas jede 6te Lamelle an ein Äquipotentialsystem an, so können infolge der Ungleichheit der Felder keine inneren Ströme entstehen, während die günstige Wirkung der Äquipotentialverbindungen auf die Kommutation erhalten bleibt.

An jedes System werden $a = 3$ Lamellen angeschlossen. Da weiter:

$$K = 609 = 3\,(33 \cdot 6 + 1 \cdot 5)$$

ist, so erhalten wir 34 Ausgleichsysteme, und zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verbindungen liegen 33mal je 6 Spulen und einmal nur 5 Spulen.

Zur Aufstellung der reduzierten Wicklungstabelle machen wir 33 Schritte gleich $6 \cdot y_k = 6 \cdot 101 = 606$ und 1 Schritt $5 \cdot y_k = 5 \cdot 101 = 505$ und wiederholen dies noch zweimal, so daß wir 3 Gruppen à 34 Lamellen erhalten. Die in der Tabelle gleichliegenden Lamellen sind an ein System anzuschließen. Tabelle III zeigt die reduzierte Wicklungstabelle und Tabelle IV die Äquipotentialverbindungen.

Verteilt man die 3 toten Spulen symmetrisch auf den Ankerumfang, indem man z. B. in den Nuten 1, 103 und 205 die linke obere Spulenseite und in den Nuten 26, 128 und 230 die linke

Digitized by Google

untere Spulenseite wegläßt, so liegen alle Spulenseiten, welche mittelst Äquipotentialverbindungen miteinander verbunden sind, in Nuten, die in Feldern gleicher Intensität liegen, und es haben auch alle die gleiche Lage in der Nut.

Tabelle III.

1 — 607 — 604 — 601 — 598 — 595
592 — 589 — 586 — 583 — 580 — 577
574 — 571 — 568 — 565 — 562 — 559
556 — 553 — 550 — 547 — 544 — 541
538 — 535 — 532 — 529 — 526 — 523
520 — 517 — 514 — 511

407 — 404 — 401 — 398 — 395 — 392
389 — 386 — 383 — 380 — 377 — 374
371 — 368 — 365 — 362 — 359 — 356
353 — 350 — 347 — 344 — 341 — 338
335 — 332 — 329 — 326 — 323 — 320
317 — 314 — 311 — 308

204 — 201 — 198 — 195 — 192 — 189
186 — 183 — 180 — 177 — 174 — 171
168 — 165 — 162 — 159 — 156 — 153
150 — 147 — 144 — 141 — 138 — 135
132 — 129 — 126 — 123 — 120 — 117
114 — 111 — 108 — 105

Tabelle IV (Äquipotentialverbindungen).

1 — 407 — 204	574 — 371 — 168	538 — 335 — 132
607 — 404 — 201	571 — 368 — 165	535 — 332 — 129
604 — 401 — 198	568 — 365 — 162	532 — 329 — 126
601 — 398 — 195	565 — 362 — 159	529 — 326 — 123
598 — 395 — 192	562 — 359 — 156	526 — 323 — 120
595 — 392 — 189	559 — 356 — 153	523 — 320 — 117
592 — 389 — 186	556 — 353 — 150	520 — 317 — 114
589 — 386 — 183	553 — 350 — 147	515 — 314 — 111
586 — 383 — 180	550 — 347 — 144	514 — 311 — 108
583 — 380 — 177	547 — 344 — 141	511 — 308 — 105
580 — 377 — 174	544 — 341 — 138	
577 — 374 — 171	541 — 338 — 135	

Feldmagnete. Wir fanden früher den Kraftfluß im Luftspalt bei Belastung $\Phi_b = 14{,}1 \cdot 10^6$.

Den Streukoeffizienten σ wählen wir vorerst zu 1,12, es ist dann der Kraftfluß im Magnetkern:

$$\Phi_m = \sigma \Phi_b = 1{,}12 \cdot 14{,}1 \cdot 10^6 = 15{,}8 \cdot 10^6.$$

Digitized by Google

Das Material der Magnetpole sei Stahlguß, und wenn vorläufig eine Induktion $B_m = 16000$ eingeführt wird, so wird der Querschnitt

$$Q_m = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{16000} \simeq 1000 \text{ cm}^2.$$

Da wir runde Pole anwenden, so wird:

$$D_m = 2\sqrt{\frac{Q_m}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{1000}{3{,}14}} \simeq \mathbf{36 \text{ cm}}$$

und

$$Q_m = \frac{D_m^2 \pi}{4} = \frac{36^2 \cdot \pi}{4} = \mathbf{1017{,}9 \text{ cm}^2}$$

$$B_m = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{1017{,}9} = \mathbf{15500.}$$

Polschuh. Für den ideellen Polbogen b_i ergibt sich:

$$b_i = a_i \tau = 0{,}7 \cdot 62{,}8 = \mathbf{44 \text{ cm}.}$$

Der Luftspalt δ ist nach Gl. 42a S. 255

$$\delta \geqq \frac{1{,}2 b_i AS - AW_z}{1{,}6 k_1 B_l} = \frac{1{,}2 \cdot 44 \cdot 248 - 4500}{1{,}6 \cdot 1{,}2 \cdot 9160} \geqq 0{,}5$$

Wir wählen $\delta = \mathbf{0{,}6 \text{ cm}},$

indem vorläufig $AW_z \simeq L_z \cdot aw_{z\,max} = 8{,}2 \cdot 440 = 4500$ gesetzt und der Koeffizient $k_1 = 1{,}2$ geschätzt wird.

Der genaue Wert von k_1 berechnet sich:

$$k_1 = \frac{t_1}{z_1 + X \cdot \delta} = \frac{24{,}6}{12{,}6 + 1{,}38 \cdot 6} = 1{,}19,$$

wobei

$$\nu = \frac{t_1 - z_1}{\delta} = 2 \text{ und } X = 1{,}38 \text{ (vgl. Fig. 315 S. 237).}$$

Wir können jetzt den genauen Wert von l_i festlegen unter der Annahme $l_1 = 36$, $l = 33$, $n_s = 3$ und $b_s = 1$ cm. Es ist die Länge eines Blechpaketes $z = \frac{l}{n_s + 1} = \frac{33}{4} = 8{,}25$ cm und $t = z + b_s = 8{,}25 + 1 = 9{,}25$ cm.

Weiter ist:

$$\nu' = \frac{l_1 - l}{n_s \cdot \delta} = \frac{3}{3 \cdot 0{,}6} = 1{,}67.$$

Hieraus ergibt sich nach Fig. 315 Seite 237 $X' = 2$ und

$$k_1' = \frac{t}{z + X' \delta} = \frac{9{,}25}{8{,}25 + 1{,}2 \cdot 0{,}6} = 1{,}03.$$

Digitized by Google

Es wird somit

$$l_i = \frac{l_1 + b_s}{k_1'} = \frac{36+1}{1{,}03} \sim \mathbf{36\ cm.}$$

Die Polschuhlänge wird

$$l_p = l_1 = \mathbf{36\ cm.}$$

Joch. Wenn man im Joch, das aus Stahlguß besteht, eine Induktion von 13500 annimmt, so wird der Querschnitt:

$$Q_j = \frac{\Phi_m}{2 \cdot B_j} = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{2 \cdot 13500} = 585\ \text{cm}^2.$$

Es sei die Länge in Achsenrichtung = 44 cm
und die radiale Höhe = 13,5 „

dann wird:

$$Q_j = \mathbf{594\ cm^2} \qquad B_j = \mathbf{13300\ cm^2}.$$

Kommutator. Die Lamellen sollen aus Hartkupfer bestehen. Die Dimensionen des Kommutators werden durch die zulässige Erwärmung bestimmt. Die Zahl der Lamellen wurde früher zu

$$K = 609$$

gefunden.

Wird die Breite einer Lamelle zu 0,66 cm und die Dicke der Isolation (Mika) zu $\delta_i = 0{,}9$ mm angenommen, so wird der Durchmesser:

$$D_k = \frac{609 \cdot 0{,}75}{\pi} = \mathbf{145\ cm}$$

und die Umfangsgeschwindigkeit

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 145 \cdot 100}{60} = \mathbf{7{,}6\ m/sec.}$$

Die größte Spannung zwischen zwei Lamellen beträgt:

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K}\left(\frac{p}{a}\right) = \frac{3{,}14 \cdot 3 \cdot 550}{609} \cdot 2 = \mathbf{17\ Volt.}$$

Bürsten. Wir verwenden Kohlenbürsten. Die Zahl der Bürstenstifte sei gleich der Polzahl $p_1 = 2p = 12$.

Die Stromstärke pro Stift wird nun

$$\frac{2 \cdot J_a}{p_1} = \frac{2 \cdot 924}{12} = 154\ \text{Amp.}$$

Unter Annahme folgender Abmessungen für eine Bürste:

Breite: $b_1 = \mathbf{2\ cm}$

Länge: $= \mathbf{3\ cm,}$

Digitized by Google

ist die Bürstendeckung $\frac{b_1}{\beta} = \frac{20}{7{,}5} = 2{,}7$ und die Auflagefläche $= 2 \cdot 3 = 6$ cm². Indem wir eine Stromdichte von 5 Amp/cm² zulassen, erhalten wir:

$$\frac{154}{6 \cdot 5} \simeq 5 \text{ Bürsten pro Stift.}$$

Bei 5 Bürsten à 6 cm² ist die Stromdichte:

$$s_u = \frac{154}{30} = \mathbf{5{,}13 \text{ Amp/cm}^2}.$$

Die Länge der 5 Bürsten ist $5 \cdot 3 = 15$ cm, die Länge des Kommutators wird also ungefähr: $\boldsymbol{L_k = 18 \text{ cm}}$. Später ist noch zu prüfen, ob die hier gefundenen Abmessungen eine genügende Abkühlung ergeben.

Die Auflagefläche aller Bürsten beträgt:

$$F_b = \frac{2 J_a}{5{,}13} = \mathbf{360 \text{ cm}^2}.$$

Berechnung der Erregung bei Leerlauf. Bei Leerlauf beträgt die Klemmenspannung 550 Volt und der zur Erzeugung dieser Spannung erforderliche Kraftfluß wird:

$$\Phi = E_a \frac{a}{N} \frac{60}{p n} 10^8 = \frac{550 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 10^8}{1218 \cdot 6 \cdot 100} = 13{,}6 \cdot 10^6.$$

Die einzelnen Induktionen berechnen sich wie folgt:

Luftinduktion B_l:

$$B_l = \frac{\Phi}{b_1 l_i} = \frac{13{,}6 \cdot 10^6}{44 \cdot 36} = \frac{\Phi}{1575} = \mathbf{8630}.$$

Bei Annahme einer Ankerinduktion $B_a = 13000$ erhält man für den effektiven Eisenquerschnitt:

$$Q_a = l h k_2 = \frac{13{,}6 \cdot 10^6}{2 \cdot 13000} = 525 \text{ cm}^2.$$

Die effektive Zahnhöhe (ohne Zähne) h des Ankers wird:

$$h = \frac{525}{33 \cdot 0{,}9} = \mathbf{17{,}5 \text{ cm}}$$

und $Q_a = l h k_2 = 33 \cdot 17{,}5 \cdot 0{,}9 = 520 \text{ cm}^2$.

$$B_a = \frac{13{,}6 \cdot 10^6}{2 \cdot 520} = \mathbf{13100}.$$

Digitized by Google

Für die ideelle Induktion in den Zähnen folgt:

$$B_{zimin} = \frac{t_1 B_l l_i}{k_2 z_1 l} = \frac{24{,}6 \cdot 8630 \cdot 36}{0{,}9 \cdot 12{,}6 \cdot 33} = 2{,}35 \cdot B_l = 20300$$

$$B_{zimitt} = \frac{t_1 B_l l_i}{k_2 z_m l} = \frac{24{,}6 \cdot 8630 \cdot 36}{0{,}9 \cdot 12{,}2 \cdot 33} = 2{,}43 \cdot B_l = 21000$$

$$B_{zimax} = \frac{t_1 B_l l_i}{k_2 z_2 l} = \frac{24{,}6 \cdot 8630 \cdot 36}{0{,}9 \cdot 11{,}8 \cdot 33} = 2{,}52 \cdot B_l = 21700.$$

Aus der Magnetisierungskurve für die Zähne (Fig. 245, Bd. I, S. 280) entnehmen wir die Werte der wirklichen Zahninduktion B_{zw}, indem:

$$k_{s\,(min)} = \frac{l_1 t_1}{l k_2 z_1} - 1 = 1{,}36,$$

$$k_{s\,(mitt)} = \frac{l_1 t_m}{l k_2 z_m} - 1 = 1{,}4,$$

$$k_{s\,(max)} = \frac{l_1 t_2}{l k_2 z_2} - 1 = 1{,}44.$$

Hiermit ergibt sich

$$B_{zwmin} = 19800,$$

$$B_{zwmitt} = 20400,$$

$$B_{zwmax} = 20900.$$

Der Streukoeffizient σ bei Leerlauf ist angenähert:

$$\sigma = 1 + \frac{5 \cdot \delta}{b_i l_i} \left(\Sigma \lambda_p + \Sigma x \lambda_m + \Sigma x \lambda_j \right).$$

Unter Zuhilfenahme der Fig. 248[1]) Seite 285, Bd. I, folgt zunächst die Leitfähigkeit zwischen den Polschuhen:

$$\Sigma \lambda_p = \frac{l_p h_p}{0{,}8 (\tau - b_p)} + 2 h_p \log \left(1 + \frac{\pi}{2} \frac{b_p}{\tau_1 - b_p} \right),$$

worin: $h_p = 4{,}5$ cm; $l_p = 36$ cm (Polschuhbreite)

$\tau_1 - b_p =$ mittlerer Abstand zweier benachbarter Polspitzen.

$\tau_1 - b_p = 23{,}5$ cm; $b_p \simeq 40$ cm; $\tau_1 = 63{,}5$ cm.

Es wird also:

$$\Sigma \lambda_p = \frac{36 \cdot 4{,}5}{0{,}8 \cdot 23{,}5} + 2 \cdot 4{,}5 \log \left(1 + \frac{\pi}{2} \frac{40}{23{,}5} \right)$$

$$\Sigma \lambda_p = 8{,}65 + 2 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}565 = \mathbf{13{,}7}.$$

[1]) Die Polschuhform wird in dieser Figur vorläufig angenommen, ihre genauere Ermittelung soll später vorgenommen werden.

Digitized by Google

Die Leitfähigkeit der Kernflächen ist (s. S. 287, Bd. I):

$$\Sigma x\,\lambda_m = \frac{d_q\,h_m}{0{,}8\,(\tau_1+\tau_2-2\,d_q)} + h_m \cdot \log\left(1+\frac{\pi\,d_q}{\tau_1+\tau_2-2\,d_q}\right).$$

Hier ist

$$d_q = \frac{D_m}{2}\sqrt{\pi};\ (D_m = \text{Durchmesser des Magnetkerns})$$

$$d_q = 18\sqrt{\pi} = 31{,}8\ \text{cm};$$

$$\tau_2 = 78{,}5\ \text{cm}; \qquad h_m = 25\ \text{cm (Kernhöhe)}.$$

$$\Sigma x\,\lambda_m = \frac{31{,}8\cdot 25}{0{,}8\,(63{,}5+78{,}5-63{,}6)} + 25\log\left(1+\frac{\pi\cdot 31{,}8}{78{,}5}\right)$$

$$\Sigma x\,\lambda_m = 12{,}7 + 25\cdot 0{,}386 = \mathbf{21{,}6}.$$

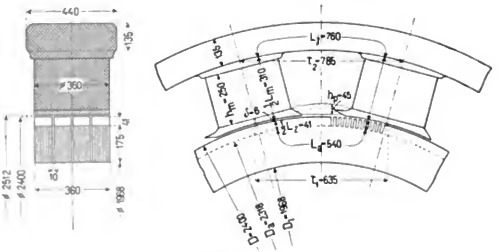


Fig. 361.

Da die Polzahl dieser Maschine verhältnismäßig groß ist, so kann

$$\Sigma x\,\lambda_j \simeq 0$$

gesetzt werden.

Wir erhalten somit für den Streukoeffizienten:

$$\sigma = 1 + \frac{5\cdot 0{,}6}{44\cdot 36}(13{,}7+21{,}6) = 1 + 0{,}0019\cdot 35{,}3 = 1{,}067 \simeq \mathbf{1{,}07}.$$

Infolge der Verschiebung der Bürsten aus der neutralen Zone tritt nicht der ganze Kraftfluß pro Pol in die Fläche einer kurzgeschlossenen Windung ein. Um diesen Einfluß zu berücksichtigen, setzen wir

$$\sigma_a \cdot 1{,}07 = 1{,}03\cdot 1{,}07 = 1{,}1.$$

$$\Phi_m = \sigma\,\sigma_a\,\Phi = 1{,}1\cdot 13{,}6\cdot 10^6 = 15\cdot 10^6;$$

Digitized by Google

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{15 \cdot 10^6}{1017{,}9} = \frac{\Phi}{930} = 14600;$$

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 Q_j} = \frac{15 \cdot 10^6}{2 \cdot 594} = \frac{\Phi}{1080} = 12600.$$

In Fig. 361 ist der mittlere Kraftlinienweg eingezeichnet. Wir finden:

$L_j = 76$ cm; $\quad L_m = 2 \cdot 31 = 62$ cm; $\quad 2\delta = 1{,}2$ cm;

$L_z = 2 \cdot 4{,}1 = 8{,}2$ cm; $\quad L_a = 54$ cm.

Die Amperewindungen bei Leerlauf sind dann folgende (nach den Magnetisierungskurven Tafel VIII):

$AW_a = aw_a L_a = 12 \cdot 54 \ldots = 650$

$B_{zwmin} = 19800; \quad aw_{zmin} = 260;$

$B_{zwmitt} = 20400; \quad aw_{zmitt} = 350;$

$B_{zwmax} = 20900; \quad aw_{zmax} = 450.$

$$AW_z = L_z \frac{aw_{zmin} + 4\, aw_{zmitt} + aw_{zmax}}{6}$$

$$= 8{,}2 \frac{260 + 4 \cdot 350 + 450}{6} \ldots = 2880$$

$AW_m = aw_m L_m = 29 \cdot 62 \ldots = 1800$

$AW_j = aw_j L_j = 15 \cdot 76 \ldots = 1140$

$AW_l = 1{,}6\, B_l\, \delta\, k_1 = 1.6 \cdot 8630 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}19 = 1{,}14\, B_l \ldots = 9850$

$AW_{ko} = 16320$

$\boldsymbol{AW_{to} = p \cdot AW_{ko} = 97920}$

Indem wir diese Rechnung für verschiedene Werte von E_a durchführen und E_a als Funktion von AW_{to} auftragen, erhalten wir die Leerlaufcharakteristik der Maschine (vergl. Tabelle V).

Die Leerlaufcharakteristik ist in Fig. 362 (Kurve *I*) eingezeichnet. Man bildet das Dreieck $Q\,b\,c$, indem der Ohmsche Spannungsabfall $\overline{Qb}$ vorläufig zu 4% angenommen wird:

$$\overline{Qb} = 0{,}04 \cdot 550 = 22 \text{ Volt},$$

ferner ist angenähert:

$$\overline{bc} = p\, AW_r = p \cdot 2 \cdot (b_c + \varrho)\, AS;$$

Digitized by Google

Tabelle V.

E_a	200	300	400	500	550	600	650	Volt
$\Phi = E_a \cdot 2{,}46 \cdot 10^4$ . .	4,92	7,4	9,85	12,4	13,6	14,9	16,1	10^6
$B_l = \frac{\Phi}{1575}$	3130	4700	6250	7900	8630	9500	10250	
$B_a = \frac{\Phi}{1040}$	4750	7100	9500	11900	13100	14300	15500	
$B_{z\,min} = 2{,}35\ B_l$ ideell .	7350	11000	14700	18500	20300	22300	24000	
$B_{z\,mitt} = 2{,}43\ B_l$ ideell .	7600	11400	15200	19200	21000	23100	24900	
$B_{z\,max} = 2{,}52\ B_l$ ideell .	7850	11800	15700	19800	21700	23800	25700	
$B_{z\,w\,min}$ wirklich	7350	11000	14700	18300	19800	21500	22600	
$B_{z\,w\,mitt}$ wirklich	7600	11400	15200	18950	20400	22000	23100	
$B_{z\,w\,max}$ wirklich	7850	11800	15700	19500	20900	22400	23600	
$B_m = \frac{\Phi}{930}$	5280	7900	10600	13300	14600	15900	17300	
$B_j = \frac{\Phi}{1080}$	4550	6850	9000	11500	12600	13800	14900	
aw_a	0,7	1,4	3,2	7,6	12	20	31,5	
$aw_{z\,min}$	1,5	5,3	23	95	260	560	820	
$aw_{z\,mitt}$	1,6	6,2	27	160	350	680	930	
$aw_{z\,max}$	1,8	7,2	34	210	450	780	1100	
aw_m	2,4	4,8	8,9	19	29	46	85	
aw_j	1,85	3,8	6	11	15	22	31	
$AW_a = 54 \cdot aw_a$ . . .	38	75	174	410	650	1080	1700	
AW_z	13	50	226	1290	2880	5540	7700	
$AW_l = 1{,}14 \cdot B_l$ . . .	3570	5350	7130	9000	9850	10800	11700	
$AW_m = 62 \cdot aw_m$ . . .	149	295	550	1170	1800	2850	5250	
$AW_j = 76 \cdot aw_j$ . . .	140	280	455	800	1140	1590	2120	
AW_{k_0}	3910	6050	8535	12670	16320	21860	28470	
$AW_{r_0} = 6 \cdot AW_{k_0}$ . .	23460	36300	51210	76020	97920	131160	170820	

Setzen wir:

$$AW_r = \frac{1}{2}(\tau - b_i)\, AS = 0{,}5 \cdot 0{,}3 \cdot 62{,}8 \cdot 248 = 2340,$$

so wird

$$p\, AW_r = 6 \cdot 2340 = 14040.$$

Die Amperewindungen bei Vollast und 550 Volt Klemmenspannung erhält man nun durch Parallelverschiebung der Geraden cQ bis $c'Q'$. Die Kurve *II* (Fig. 362) stellt den Zusammenhang zwischen dem Belastungsstrom (Maßstab rechts) und den entsprechenden Amperewindungen (QQ') dar (s. Fig. 467 Seite 611 Bd. I).

Aus der Leerlaufcharakteristik kann noch rückwärts die äußere Charakteristik konstruiert werden (vergl. hierüber Fig. 468, Seite 612, Bd. I). In unserem Falle verläuft die äußere Charakteristik fast als horizontale Linie.

Digitized by Google

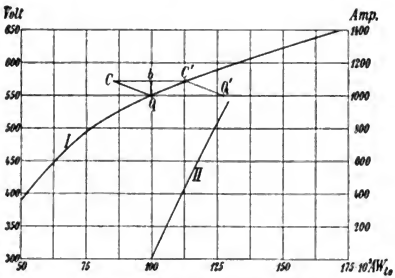


Fig. 362. Leerlaufcharakteristik.

Berechnung der Erregung bei Belastung. Wir nehmen

$$E_a = 1{,}04 \cdot P = 572 \text{ Volt}$$

an, dann folgt für

$$\Phi_b = E_a \frac{a}{N} \frac{60}{pn} 10^8 = \frac{572 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 10^8}{1218 \cdot 6 \cdot 100} = 14{,}1 \cdot 10^6,$$

$$B_l = \frac{\Phi_b}{b_i l_i} = \frac{14{,}1 \cdot 10^6}{1575} = \mathbf{8950},$$

$$B_a = \frac{\Phi_b}{2 l h k_2} = \frac{14{,}1}{1040} = \mathbf{13600},$$

$$B_{z\,min} = 2{,}35\, B_l = \mathbf{21050},$$

$$B_{z\,mitt} = 2{,}43\, B_l = \mathbf{21800},$$

$$B_{z\,max} = 2{,}52\, B_l = \mathbf{22500},$$

$$B_{z\,min} = 20400; \quad B_{z\,mitt} = 21000; \quad B_{z\,max} = 21400,$$

$$aw_{z\,min} = 350; \quad aw_{z\,mitt} = 460; \quad aw_{z\,max} = 550.$$

$$AW_z = 8{,}2 \frac{350 + 4 \cdot 460 + 550}{6} \ldots\ldots\ldots = 3740,$$

$$AW_l = 1{,}14 \cdot B_l = 1{,}14 \cdot 9160 \ldots\ldots\ldots = 10200,$$

$$AW_a = aw_a \cdot L_a = 14{,}5 \cdot 54 \ldots\ldots\ldots = 785,$$

$$AW_r \sim 0{,}5 \cdot 0{,}3 \cdot 62{,}8 \cdot 248 \ldots\ldots\ldots = 2340$$

$$AW_z + AW_l + AW_a + AW_r \ldots\ldots\ldots = 17065$$

$$\sigma_b = 1 + \frac{2(AW_l + AW_a + AW_z + AW_r)}{\Phi_b} (\Sigma \lambda_p + \Sigma x \lambda_m + \Sigma x \lambda_j),$$

$$\sigma_b = 1 + \frac{2 \cdot 17315}{14{,}1 \cdot 10^6} \cdot 35{,}3 = 1 + 0{,}0868 \simeq 1{,}1.$$

Digitized by Google

Indem $\sigma_a = 1{,}02$ gesetzt wird, folgt:

$$\Phi_m = \sigma_a \sigma_b \Phi = 1{,}12 \cdot 14{,}1 \cdot 10^6 = 15{,}8 \cdot 10^6,$$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{1017{,}9} = \mathbf{15500},$$

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 Q_j} = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{2 \cdot 594} = \mathbf{13300},$$

$$AW_m = a w_m L_m = 39 \cdot 62 = 2420,$$

$$AW_j = a w_j L_j = 19 \cdot 76 = 1440,$$

$$\mathbf{AW_k = 17065 + 3860 = 20925},$$

$$\mathbf{AW_t = p AW_k = 6 \cdot 20925 = 125550},$$

$$\frac{AW_l + AW_z}{b_i AS} = \frac{13940}{44 \cdot 248} = \mathbf{1{,}28},$$

$$\frac{AW_t}{AW_{to}} = \frac{125550}{97920} = \mathbf{1{,}28},$$

$$\frac{2 AW_t}{N \cdot i_a} = \frac{2 \cdot 125550}{1218 \cdot 154} = \mathbf{1{,}34}.$$

Erregung.

1. Nebenschlußerregung. Die zwölf Spulen sollen in Serie geschaltet werden. Der Drahtquerschnitt der Erregerwicklung ergibt sich aus:

$$q_n = \frac{(1 + 0{,}004\, T_m)\, AW_{to}\, l_n}{5700 \cdot P} \cdot (1{,}05 \text{ bis } 1{,}1).$$

Indem

$$l_n \simeq \pi (D_m + 5) = \pi (36 + 5) \simeq 130 \text{ cm}.$$

$P = 550$ Volt; $T_m \simeq 50^0$; $AW_{to} = 97920$ (siehe S. 323),

wird

$$q_n = \frac{1{,}2 \cdot 97920 \cdot 130}{5700 \cdot 550} \cdot 1{,}09 = 5{,}30 \text{ mm}^2.$$

Nehmen wir den Draht mit $\phi = 2{,}6/3{,}2$ mm, so wird

$$\mathbf{q_n = 5{,}31 \text{ mm}^2}.$$

Ferner sei die Stromdichte $s_n = \mathbf{1{,}5}$ Amp./mm² gewählt; dann wird der Erregerstrom bei Vollast

$$i_n = 1{,}5 \cdot 5{,}31 = 8{,}0 \text{ Amp.}$$

und die totale Windungszahl

$$w_n = \frac{AW_{to}}{i_n} = \frac{97920}{8{,}0} = 12200.$$

Digitized by Google

Pro Spule erhalten wir

$$\frac{12\,200}{12} \simeq 1000 \text{ Windungen.}$$

Es wird also

$$w_n = \mathbf{12000.}$$

Widerstand der Nebenschlußwicklung

$$R_n = \frac{(1 + 0{,}004\, T_m)\, w_n\, l_n}{5700 \cdot q_n} = \frac{1{,}2 \cdot 12000 \cdot 130}{5700 \cdot 5{,}31} = \mathbf{62\ \Omega},\ \text{warm},$$

$$i_{n\,max} = \frac{P}{R_n} = \frac{550}{62} = 8{,}9 \text{ Amp.},$$

$$s_{n\,max} = \frac{i_{n\,max}}{q_n} = \frac{8{,}9}{5{,}31} = 1{,}68 \text{ Amp./mm}^2$$

Bei Leerlauf wird die Stromstärke im Nebenschluß

$$i_{n\,o} = \frac{AW_{t\,o}}{w_n} = \frac{97\,920}{12\,000} = 8{,}15 \text{ Amp.}$$

und der erforderliche Widerstand im Nebenschluß nach Gl. 61, Seite 263

$$r_n = 1{,}2\left(\frac{P}{i_{n\,o}} - \frac{l_n\, w_n}{5700 \cdot q_n}\right) =$$

$$= 1{,}2\left(\frac{550}{8{,}15} - \frac{130 \cdot 12\,000}{5700 \cdot 5{,}31}\right) \simeq 19\ \Omega.$$

Durch einiges Probieren erhält man für

die radiale Höhe des Wicklungsraumes $h_s = 18$ cm,
„ Breite „ „ $b_s = 5{,}5$ „

Die Spule besteht dann aus 18 Lagen à 56 Windungen.

2. Hauptschlußerregung. Die zur Kompoundierung notwendigen Amperewindungen sind

$$AW_h = AW_t - AW_{t\,o} = 125\,550 - 97\,920 = 27\,630$$

und pro Spule erhält man

$$\frac{27\,630}{12} = 2300 \text{ Amperewindungen.}$$

Die Spulen werden in vier parallel geschalteten Gruppen angeordnet, so daß in jeder Gruppe nur $^1/_4$ des Belastungsstromes fließt. Die Windungen der Hauptschlußwicklung pro Pol sind alsdann

$$\frac{2300}{\frac{919}{4}} \simeq 10.$$

Digitized by Google

Der Sicherheit wegen wollen wir jedoch zwölf Windungen pro Pol rechnen, um die genaue Einstellung der Kompoundierung durch eine Nebenschließung vornehmen zu können.

Die gesamte Windungszahl beträgt somit

$$w_h = 12 \cdot 12 = 144.$$

Sei eine Stromdichte $s_h = 1{,}6$ Amp./mm² zugelassen, so wird der Querschnitt

$$q_h = \frac{910}{4 \cdot 1{,}6} = 142 \text{ mm}^2.$$

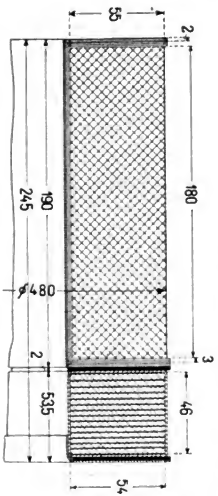


Fig. 363.

Nehmen wir Flachkupfer von $3{,}0 \times 48$, so wird

$$q_h = \mathbf{144 \text{ mm}^2}$$

und

$$s_h = \frac{910}{4 \cdot 144} = \mathbf{1{,}58 \text{ Amp./mm}^2}$$

Indem die Wicklung hochkantig ausgeführt und zwischen je zwei nebeneinanderliegenden Windungen 0,5 mm Isolierstoff eingelegt wird, ergeben sich folgende Abmessungen für den Wicklungsraum der Hauptschlußwicklung.

Höhe $= b_h = 4{,}6$ cm
Breite $= h_h = 4{,}8$ „

Die Gesamtanordnung der Magnetwicklung zeigt Fig. 363.[1])

Die mittlere Windungslänge wird nun

$$l_h = \pi (36 + 5 \text{ cm}) = 130 \text{ cm}.$$

Da die Hauptschlußwicklung aus vier parallelen Zweigen besteht, so sind die Windungen von je drei Polen in Serie und ihr Widerstand wird

$$R_h = \frac{1}{4} \frac{(1 + 0{,}004 \cdot T_m) \cdot l_h \frac{w_h}{4}}{5700 \cdot q_h} = \frac{1{,}2 \cdot 130 \cdot 36}{4 \cdot 5700 \cdot 144} = \mathbf{0{,}00171\ \Omega}.$$

[1]) Die Höhe h_h ist bei einer späteren Korrektur (S. 343) auf 5,4 cm vergrößert.

Digitized by Google

Verluste: 1. Armatur.

a) Eisenverluste.

$$\text{Periodenzahl } c = \frac{p\,n}{60} = \frac{6 \cdot 100}{60} = 10{,}0.$$

$$\text{Hysteresiskonstante } \sigma_h = \frac{\eta}{0{,}0016}.$$

Für $\eta = 0{,}0032$ folgt

$$\sigma_h = \frac{0{,}0032}{0{,}0016} = \mathbf{2{,}0.}^{1})$$

Das Eisenvolumen des Kerns ist (vergl. Fig. 361)

$$V_a = (D_a^2 - D_i^2)\frac{\pi}{4} l\, k_2 = (23{,}18^2 - 19{,}68^2)\frac{\pi}{4} \cdot 3{,}3 \cdot 0{,}9 = 350 \text{ dm}^3.$$

Eisenvolumen der Zähne:

$$V_z = Z \cdot z_m \frac{1}{2} L_z\, l\, k_2 = 306 \cdot 0{,}122 \cdot 0{,}41 \cdot 3{,}3 \cdot 0{,}9 = 45{,}5 \text{ dm}^3.$$

Hysteresisverlust im Ankerkern:

$$W_{ha} = \sigma_h \left(\frac{c}{100}\right)\left(\frac{B_a}{1000}\right)^{1{,}6} V_a = 2 \cdot \frac{10}{100} \cdot \left(\frac{13\,600}{1000}\right)^{1{,}6} \cdot 350 = \mathbf{4550 \text{ Watt.}}$$

Hysteresisverlust in den Zähnen:

$$W_{hz} = \sigma_h k_4 \frac{c}{100}\left(\frac{B_{z\,w\,min}}{1000}\right)^{1{,}6} V_z = 2 \cdot 1 \cdot 0{,}1 \cdot (20{,}4)^{1{,}6} \cdot 45{,}5 = \mathbf{1150 \text{ Watt.}}$$

Wirbelstromkonstante: $\sigma_w = \mathbf{15}$.

Wirbelstromverlust im Ankerkern:

$$W_{wa} = \sigma_w \left(\Delta \frac{c}{100} \frac{B_a}{1000}\right)^2 V_a = 15\,(0{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 13{,}6)^2 \cdot 350 = \mathbf{2430.}$$

Wirbelstromverlust in den Zähnen:

$$W_{wz} = \sigma_w k_5 \left(\Delta \frac{c}{100} \frac{B_{z\,w\,min}}{1000}\right)^2 V_z = 15 \cdot 1 \cdot (0{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 20{,}4)^2 \cdot 45{,}5 =$$
$$= \mathbf{700 \text{ Watt.}}$$

Totaler Eisenverlust:

$$W_{ha} + W_{wa} + W_{hz} + W_{wz} = 4550 + 1150 + 2430 + 700 = \mathbf{8830 \text{ Watt.}}$$

b) Stromwärmeverluste.

Stablänge:

$$l_a \simeq l_1 + 1{,}4\,\tau + 5 \text{ cm} = 36 + 1{,}4 \cdot 62{,}8 + 5 = 129 \text{ cm.}$$

[1]) Für sehr gute Blechsorten darf $\sigma_h = 1{,}5$ und noch kleiner genommen werden.

Digitized by Google

Ankerwiderstand:

$$R_a = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a(1+0{,}004\,T_a)}{5700 \cdot q_a} = \frac{1218}{6^2} \cdot \frac{129 \cdot (1+0{,}16)}{5700 \cdot 49} = \mathbf{0{,}0181\,Ohm.}$$

Spannungsverlust in der Ankerwicklung:

$$J_a R_a = 924 \cdot 0{,}0181 = 16{,}7 \text{ Volt.}$$

Stromwärmeverlust im Ankerkupfer:

$$W_{ka} = J_a^2 R_a = 924 \cdot 16{,}7 = \mathbf{15400\ Watt.}$$

$$W_{kz} = \frac{l_1}{l_a} W_{ka} = \frac{36}{129}\, 15\,400 = 4300 \text{ Watt.}$$

Abkühlungsfläche des Ankers:

$$A_a = \pi D l_1 = 3{,}14 \cdot 240 \cdot 36 = 27\,200 \text{ cm.}$$

Spezifische Kühlfläche:

$$a_a = \frac{A_a}{W_{kz} + W_{hz} + W_{wz}} (1 + 0{,}1\,v) =$$

$$= \frac{27\,200}{4300 + 1150 + 700} (1 + 1{,}25) = 10 \text{ cm}^2/\text{Watt.}$$

Temperaturerhöhung:

$$T_a = \frac{350}{10} \backsimeq \mathbf{35^\circ\ C.}$$

Kommutatorverluste:

$$W_u = 2 J_a \Delta P f_u.$$

Wir setzen $f_u = 1{,}3$ und für mittelharte Kohlen $\Delta P = 1{,}0$, es wird dann:

$$W_u = 2 J_a \Delta P f_u = 1848 \cdot 1 \cdot 1{,}3 = \mathbf{2400\ Watt.}$$

Der Auflagedruck pro cm² sei $g = 0{,}14$ kg und der Reibungskoeffizient $\varrho = 0{,}25$.

Dann wird der Wattverlust durch Reibung

$$W_r = 9{,}81 \cdot v_k F_b g \varrho = 9{,}81 \cdot 7{,}6 \cdot 360 \cdot 0{,}14 \cdot 0{,}25 = \mathbf{940\ Watt.}$$

Die spezifische Abkühlungsfläche des Kommutators ist

$$a_k = \frac{\pi D_k L_k}{W_u + W_r} (1 + 0{,}1\,v_k) = \frac{3{,}14 \cdot 145 \cdot 18}{2400 + 940} (1 + 0{,}76) = 4{,}32 \text{ cm}^2/\text{Watt,}$$

$$T_k = \frac{100 \text{ bis } 150}{a_k} = \frac{120}{4{,}32} \backsimeq \mathbf{28^\circ\ C.}$$

Erregerverluste.

Wattverlust in der Hauptschlußwicklung:

$$W_H = R_h J^2 = 0{,}00171 \cdot 910^2 = \mathbf{1410\ Watt.}$$

Digitized by Google

Wattverlust in der Nebenschlußwicklung:

$$W_n = R_n i_n^2 = 62 \cdot 8{,}15 = \mathbf{4130\ Watt.}$$

Die Abkühlungsfläche der Spulen berechnet sich in folgender Weise. Für die Abkühlungsfläche einer Spule gilt nach Fig. 363

$$\pi \cdot 48 \cdot 24 + \frac{\pi}{4}(48^2 - 36^2) = 3600 + 792 = 4392$$

und somit für alle Spulen

$$A_m = 12 \cdot 4392 \cong 52500.$$

Es wird dann die spezifische Kühlfläche

$$a_m = \frac{A_m}{W_n + W_H} = \frac{52500}{4130 + 1410} = 9{,}5\ \text{cm}^2/\text{Watt}$$

und die Temperaturerhöhung

$$T_m = \frac{500}{a_m} = \frac{500}{9{,}5} \cong \mathbf{53^0\ C.}$$

Die mit dem Thermometer gemessene Temperaturerhöhung würde etwa 0,6 bis $0{,}7\, T_m = 32{,}5^0$ bis 38^0 C betragen.

Die totalen Verluste im Nebenschluß sind

$$W_{nt} = P i_n = 550 \cdot 8{,}15 = \mathbf{4480\ Watt.}$$

Die Verluste durch Lager- und Luftreibung werden zu $1\,^0/_0$ geschätzt, also

$$W_R \cong 5000\ \text{Watt}.$$

Die Summe aller Verluste ist

$$W_v = W_k + W_h + W_w + W_e.$$

Bei Vollast ist

$$W_k = W_{ka} + W_u + W_H + W_{nt} = 15400 + 2400 + 1410 + 4480 = 23690\ \text{Watt}$$
$$W_h = W_{ha} + W_{hz} = 4550 + 1150 = 5700$$
$$W_w = W_{wa} + W_{wz} = 2430 + 700 = 3130$$
$$W_e = W_r + W_R = 940 + 5000 = 5940$$

Summe aller Verluste $\mathbf{W_v = 38460\ Watt.}$

Wirkungsgrad bei Vollast

$$\eta = \frac{\text{Leistung}}{\text{Leistung} + \text{Summe aller Verluste}},$$

$$\eta = \frac{500000}{500000 + 38460} = \frac{500000}{538460} = \mathbf{92{,}9\,^0/_0}.$$

Digitized by Google

Bei Halblast bleiben die Verluste W_{nt}, W_h, W_w und W_ϱ annähernd unverändert; W_{ka} und W_H nehmen mit dem Quadrat, W_u nur etwa proportional der Stromstärke ab. Es ergibt sich

$$W_k = \frac{15400}{4} + \frac{2400}{2\cdot} + \frac{1410}{4} + 4480 = 9880 \text{ Watt}$$

$$W_h + W_w + W_\varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad = 14770 \quad ,$$

Summe aller Verluste = 24 650 Watt.

Wirkungsgrad bei Halblast

$$\eta = \frac{250000}{274650} = 91\,\%.$$

Nachprüfung der Maschine auf Kommutierung. Wir denken uns die Bürsten so eingestellt, daß die Kommutation bei Leerlauf und bei Vollast unter gleich günstigen Bedingungen stattfindet.

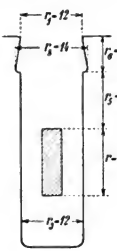


Fig. 364.

Die Ankerkonstante wird:

$$\frac{N}{K} l_i v A S \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 35 \cdot 12{,}5 \cdot 248 \cdot 10^{-6} = 0{,}217.$$

Es ergeben sich die Leitfähigkeiten aus Fig. 364 zu:

$$\lambda_n = 1{,}25 \left(\frac{r}{3 r_3} + \frac{r_b}{r_3} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_6} \right) =$$

$$= 1{,}25 \left(\frac{13}{3 \cdot 12} + \frac{11}{12} + \frac{2 \cdot 7}{12 + 14} \right) = 2{,}27$$

$$\lambda_{nz} = 1{,}25 \left(\frac{r_5}{r_3} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_6} \right) = 1{,}25 \left(\frac{11}{12} + \frac{2 \cdot 7}{12 + 14} \right) = 1{,}82$$

$$\lambda_{ks} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi l_1}{2 r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 24{,}6}{2 \cdot 1{,}2} = 0{,}47$$

$$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \left(\frac{\pi (\tau - b_i)}{r_1} \right) = 0{,}92 \log_{10} \left(\frac{\pi \cdot 18{,}8}{1{,}2} \right) = 1{,}55$$

$$\lambda_s = 0{,}8; \; l_s = 93 \text{ cm}.$$

Es wird somit

$$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\, \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 2{,}27 + 0{,}47 + 0{,}5 \cdot 0{,}8 \frac{93}{35} = 3{,}8$$

$$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\, \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 1{,}82 + 1{,}55 + 0{,}5 \cdot 0{,}8 \frac{93}{55} = 4{,}45$$

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 1{,}82 + 1{,}55 + 0{,}8 \frac{93}{35} = 5{,}5.$$

Digitized by Google

Weiter ist die auf den Ankerumfang reduzierte Bürstenbreite bezw. Lamellenteilung

$$b_D = b_1 \frac{D}{D_k} = 20 \frac{240}{145} = 33{,}1 \text{ mm}$$

$$\beta_D = \beta \frac{D}{D_k} = 7{,}5 \frac{240}{145} = 12{,}4 \text{ mm}.$$

Die Formel für die Kurzschlußspannung Δe_v lautet

$$\Delta e_v = S_k \frac{N}{K} l_i v A S \left(\frac{t_1 \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D} + \lambda_{qv} \right) 10^{-8} \text{ Volt}.$$

Es wird das Glied

$$\frac{t_1 \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D} = \frac{24{,}6 \cdot 3{,}8}{24{,}6 + 33{,}1 - \frac{3}{6} \cdot 12{,}4} = \frac{24{,}6}{51{,}5} \cdot 3{,}8 = 1{,}82.$$

Nehmen wir an, daß die Polspitze an der Eintrittsseite gesättigt ist, und daß die Amperewindungen für diese Spitze gleich:

$$^1/_2 A W_p = 0{,}375\, b_i A S,$$

oder

$$A W_p = 0{,}75\, b_i A S$$

sind, so entnehmen wir der Kurve Fig. 342, Seite 291 für $C = 0{,}75$ und $\alpha_i = 0{,}7$ die Leitfähigkeit $\lambda_{qv} = 3{,}05$.

Die maximale Zahl der zwischen den Bürstenkanten kurzgeschlossenen Spulen wird

$$S_k = \left(\frac{b_1}{\beta}\right) + \frac{p}{a} = \left(\frac{20}{7{,}5}\right) + \frac{6}{3} = 6.$$

Es wird somit die Kurzsschlußspannung

$$\Delta e_v = 6 \cdot 0{,}217 (1{,}82 + 3{,}05) = \mathbf{6{,}35\ Volt.}$$

Dieser Wert ist als zulässig zu bezeichnen.

Die auf Parallelwicklung reduzierte Bürstenbreite ist

$$b_r = b_1 + \beta \left[1 - (1 + p_w) \frac{a}{p} \right] = 20 + 7{,}5 \left(1 - \frac{3}{6} \right) = 23{,}75 \text{ mm}.$$

Es wird somit die effektive Reaktanzspannung

$$e_s = \frac{\beta}{b_r} (1 + p_w) \frac{N}{K} l_i v A S \lambda_{Lr} \cdot 10^{-8} =$$

$$= \frac{7{,}5}{23{,}75} \cdot 0{,}217 \cdot 5{,}5 = \mathbf{0{,}37\ Volt},$$

welcher Wert zulässig ist.

Digitized by Google

Die mittlere Reaktanzspannung einer Spule wird

$$e_{r_s} = 2\left(\frac{N}{K} l_i v\, AS\, 10^{-6}\right) \frac{t_1 \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} = 2 \cdot 0{,}217 \cdot 1{,}82 = 0{,}79 \text{ Volt.}$$

Um die maximale Reaktanzspannung einer Spule $e_{r\,max}$ zu ermitteln, berechnen wir zuerst die Konstante C_N.

Da $\frac{b_r}{\beta} > \frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon$, so ist $u_k = u_n$ zu setzen, es wird dann

$$C_N = \frac{\frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon}{\frac{b_r}{\beta}}.$$

Es ist

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{609}{6} - 103\right) = \frac{1}{4}$$

und somit

$$C_N = \frac{2 - \frac{3}{4}}{\frac{23{,}75}{7{,}5}} \simeq 0{,}4$$

Es wird dann:

$$e_{r\,max} = e_{r_s} \frac{\lambda_{N_s} + C_N \lambda_{N_z}}{\lambda_{N_s}} = 0{,}79 \frac{3{,}8 + 0{,}4 \cdot 4{,}45}{3{,}8} = 1{,}16 \text{ Volt.}$$

Bei $\frac{5}{4}$ Belastung ändert sich allein der Wert von AS und wir erhalten die Ankerkonstante $\frac{N}{K} l_i v\, AS \cdot 10^{-6} = 0{,}34$

Kurzschlußspannung	$\Delta e_k = 7{,}95$ Volt
Effektive Reaktanzspannung	$e_s = 0{,}545$ „
Maximale Reaktanzspannung	$e_{r\,max} = 1{,}45$ „

Es darf angenommen werden, daß die Maschine bei sorgfältiger Ausführung bei dieser Belastung gerade noch funkenfrei arbeitet, so daß zwischen Leerlauf und $\frac{5}{4}$ Belastung keine Bürstenverstellung erforderlich ist.

Die Bürsten müssen so eingestellt werden, daß bei Leerlauf sich die kurzgeschlossenen Spulen in einem Felde von der mittleren Stärke B_o bewegen, wobei

$$B_o = AS\left(\frac{t_1 \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} + \lambda_q\right) = 248\,(1{,}82 + 3{,}05) = 1210.$$

Digitized by Google

Berechnung der Gewichte. 1. Kupfergewichte:

a) Ankerkupfer:

$$G_{ka} = N l_a q_a \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 1218 \cdot 129 \cdot 49 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 700 \text{ kg}$$

b) Magnetkupfer:

Gewicht der Nebenschlußwicklung:

$$w_n l_n q_n \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 12000 \cdot 130 \cdot 5{,}31 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 735 \text{ kg}$$

Gewicht der Hauptschlußwicklung:

$$w_h l_h q_h \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 144 \cdot 130 \cdot 144 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 240 \text{ kg}$$

Gesamtgewicht des Magnetkupfers:

$$G_{km} = 735 + 240 = 975 \text{ kg}$$

$$G_k = G_{ka} + G_{km} = 700 + 975 = \mathbf{1675 \text{ kg}}$$

$$\frac{G_{km}}{G_{ka}} = \frac{975}{700} = 1{,}39.$$

c) Kommutatorkupfer:

$$G_{kk} = K(\beta - \delta_i)(L_k + 4 \text{ cm}) \cdot \text{Lamellenhöhe} \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 609 \cdot 0{,}66 \cdot 22 \cdot 3{,}5 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 275 \text{ kg}$$

Gesamtes Kupfergewicht:

$$\Sigma(G_k) = G_{ka} + G_{km} + G_{kk} = 700 + 975 + 275 = \mathbf{1950 \text{ kg}}$$

2. Eisengewichte:

a) Gewicht des Armatureisenblechs:

$$G_{ea} = (V_a + V_z)\, 7{,}88 = (350 + 45{,}5) \cdot 7{,}8 = \mathbf{3100 \text{ kg}}.$$

b) Gewicht der Magnete:

Gewicht der Magnetkerne: (Stahlguß)

$$2p\, Q_m \cdot \text{Höhe der Magnetkerne} \cdot 7{,}86 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 12 \cdot 1018 \cdot 26 \cdot 7{,}86 \cdot 10^{-3} = 2480 \text{ kg}.$$

Gewicht der Polschuhe:

$$2p\, l_p b_m k_2 \cdot \text{Höhe} \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 36 \cdot 40 \cdot 0{,}9 \cdot 2{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} \simeq 300 \text{ kg}.$$

Gesamtgewicht der Magnete ohne Joch:

$$G_{em} = 2480 + 300 = \mathbf{2780}.$$

c) Gewicht des Jochs (Stahlguß):

$$G_{ej} = Q_j \pi \cdot \text{mittlerer Jochdurchmesser} \cdot 7{,}86 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 594 \cdot 3{,}14 \cdot 319 \cdot 7{,}86 \cdot 10^{-3} = \mathbf{4700 \text{ kg}}.$$

Gesamtgewicht des Magnetsystems:

$$G_{em} + G_{ej} = 2780 + 4700 = \mathbf{7480 \text{ kg}}.$$

Digitized by Google

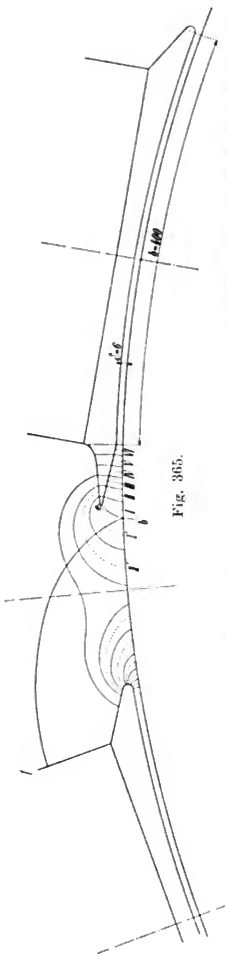


Fig. 365.

Berechnung der Polschuhform und der Feldkurven. Bekannt ist der ideelle Polbogen $b_i = 44$ cm. Den größten Abstand zwischen den Polspitzen wählen wir vorläufig 2 cm größer, da die Spitze an der Eintrittseite stark gesättigt wird. In Fig. 365 (bezw. 366) zeichnen wir zuerst die untere Begrenzungslinie des Polschuhes auf.

Die Abschrägung der Polspitze an der Eintrittseite ist so gewählt, daß die Kommutierungszone außerhalb des äußersten Teiles der Spitze fällt. Die Kraftröhrenlänge in der Kommutierungszone ist nach Gl. 124 S. 298

$$\delta_1 = \frac{AW_i + AW_z - AW_p}{1{,}6\, B_o} \cdot \frac{b_z}{a_z}.$$

Es ist nach früherem

$$B_o = AS\left(\frac{t_1 \lambda_{Na}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} + \lambda_q\right) =$$

$$= 245\,(1{,}82 + 3{,}05) = 1210.$$

$$AW_i = 9850; \qquad AW_z = 2880.$$

AW_p haben wir zu:

$$0{,}75 \cdot b_i\, AS = 0{,}75 \cdot 44 \cdot 248 = 8200$$

angenommen, und da $\frac{b_z}{a_z} \cong 0{,}95$ ist, wird

$$\delta_1 = \frac{9850 + 2880 - 8200}{1{,}6 \cdot 1210} \cdot 0{,}95 =$$

$$= 2{,}2 \text{ cm}.$$

Für die in dieser Weise gefundene Bürstenstellung ergibt sich für $\varrho = 0$, $\delta_a = \overline{bc}$ und $\delta_b = \overline{bf}$ (Fig. 365).

$$\lambda_q = \frac{b_z - \frac{AW_p}{2 \cdot AS}}{1{,}6 \cdot \delta_a} + \frac{\tau - b_z}{1{,}6 \cdot \delta_b} =$$

$$= \frac{24{,}7 - \frac{8200}{2 \cdot 248}}{1{,}6 \cdot 2{,}35} + \frac{62{,}8 - 24{,}7}{1{,}6 \cdot 26} = 3{,}1.$$

Digitized by Google

Diese Leitfähigkeit weicht wenig von dem angenommenen Wert ab, so daß wir mit dieser Bürstenstellung weiter rechnen können. Die untere Begrenzungslinie der Polspitze ist somit bekannt, und es ist jetzt die Stärke derselben festzulegen.

Wir zeichnen jetzt die obere Begrenzungslinie schätzungsweise auf, wofür die Polschuhformen (Fig. 353, S. 300) gute Anhaltspunkte geben. Die Röhren, welche von der oberen Kante des Polschuhes ausgehen, können jetzt aufgezeichnet werden. Wir betrachten bei der weiteren Berechnung nur die Röhren I' und II' (Fig. 366), indem wir den Kraftfluß durch die übrigen Kraftröhren, welche von der oberen Polschuhfläche ausgehen, vernachlässigen. Auf die Leitfähigkeit der Röhren I' und II' hat eine etwas falsche Annahme der oberen Begrenzungslinie des Polschuhes nur einen geringen Einfluß.

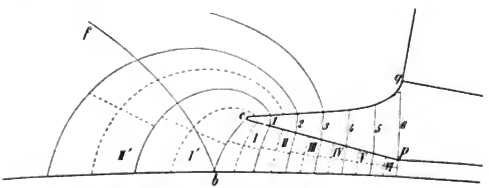


Fig. 366. Polspitze in halber natürlicher Größe.

Zwischen dem Querschnitt pq und dem Ankereisen wirkt die MMK: $\frac{1}{2}(AW_l + AW_z)$. Wir machen nun die weitere Annahme, daß die Amperewindungen $^1/_2\, AW_p$ sich gleichmäßig über die 6 cm lange Polspitze verteilen. Man erhält somit eine Amperewindungszahl $aw_p = \frac{4100}{6} = 683$ pro 1 cm Länge der Polspitze; hierdurch ist die mittlere MMK, die auf jede zwischen der Polspitze und Armaturfläche verlaufende Röhre wirkt, bekannt. Diese MMKe der einzelnen Röhren sind (vergl. Fig. 366):

$$AW_I = \frac{1}{2}(AW_l + AW_z) - 5{,}5\, aw_p = 6365 - 3760 = 2605$$

$$AW_{II} = \frac{1}{2}(AW_l + AW_z) - 4{,}5\, aw_p = 6365 - 3080 = 3285$$

$$AW_{III} = \frac{1}{2}(AW_l + AW_z) - 3{,}5\, aw_p = 6365 - 2390 = 3975$$

$$AW_{IV} = \frac{1}{2}(AW_l + AW_z) - 2{,}5\, aw_p = 6365 - 1710 = 4655$$

Digitized by Google

$$AW_V = \frac{1}{2}(AW_i + AW_z) - 1{,}5\,aw_p = 6365 - 1030 = 5335$$

$$AW_{VI} = \frac{1}{2}(AW_i + AW_z) - 0{,}5\,aw_p = 6365 - 340 = 6025.$$

Die Leitfähigkeit der Röhren *I*, *II* und *I'*, *II'* ergeben sich zu

$$\lambda_I = 0{,}75; \quad \lambda_{II} = 0{,}77; \quad \lambda_I' = 0{,}7; \quad \lambda_{II}' = 0{,}35,$$

und die Kraftflüsse dieser Röhren pro Zentimeter Ankerlänge zu

$$\Phi_I + \Phi_I' = AW_I\,(\lambda_I + \lambda_I') = 2605 \cdot 1{,}45 = 3770$$

$$\Phi_{II} + \Phi_{II}' = AW_{II}(\lambda_{II} + \lambda_{II}') = 3285 \cdot 1{,}12 = 3780.$$

Die Kraftflüsse der Röhren *III*, *IV*, *V* und *VI* würden, in gleicher Weise ermittelt, zu große Werte ergeben, weil hierbei die Änderung von AW_z unberücksichtigt bliebe.

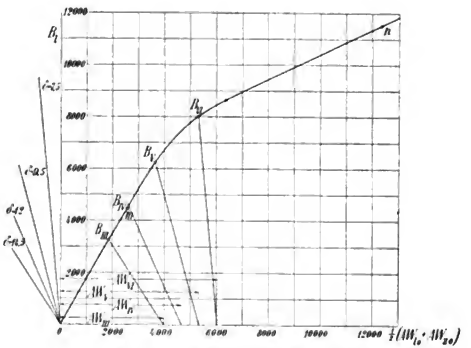


Fig. 367. Übertrittcharakteristik.

Um sie zu bestimmen, berechnen wir zuerst die Übertrittcharakteristik (Fig. 367) nach der auf S. 313, Bd. I beschriebenen Art, indem wir die angenommenen Induktionen B_l als Ordinaten und die dazu berechneten Amperewindungen (Tab. V, S. 323)

$$\frac{1}{2}(AW_i + AW_z) = 0{,}8\,B_l\,\delta\,k_1 + \frac{1}{2}AW_z$$

als Abszissen auftragen. Vom Punkte 0 aus werden für andere

Digitized by Google

Luftwege δ_x Strahlen gezogen, deren Abstände von der Ordinatenachse gemessen

$$0{,}8\, B_1(\delta k_1 - \delta_x k_{1x})$$

sind. Tragen wir nun die Amperewindungen AW_{III}, AW_{IV}, AW_V und AW_{VI} von 0 aus auf die Abszissenachse ab und ziehen wir aus den Endpunkten dieser Strecken Parallele zu den zugehörigen Strahlen δ_x, so ergeben sich aus den Schnittpunkten dieser Geraden mit der Übertritteharakteristik die Induktionen

$$B_{III} = 3250; \quad B_{IV} = 4550; \quad B_V = 6250; \quad B_{VI} = 8000.$$

Multiplizieren wir diese Induktionen mit den aus Fig. 366 zu entnehmenden zugehörigen Querschnitten der Kraftröhren, so erhalten wir die Kraftflüsse pro 1 cm Ankerlänge

$$\begin{aligned} \Phi_{III} &= 3250 \cdot 1{,}1 = 3580 \\ \Phi_{IV} &= 4550 \cdot 1 \;\; = 4550 \\ \Phi_V &= 6250 \cdot 1 \;\; = 6250 \\ \Phi_{VI} &= 8000 \cdot 1 \;\; = 8000. \end{aligned}$$

Durch die verschiedenen Querschnitte 1, 2, 3 usf. der Polspitze gehen also die Kraftflüsse:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_I + \Phi_I' = 3770 \\ \Phi_2 &= \Phi_1 + \Phi_{II} + \Phi_{II}' = 7550 \\ \Phi_3 &= \Phi_2 + \Phi_{III} = 11130 \\ \Phi_4 &= \Phi_3 + \Phi_{IV} = 15680 \\ \Phi_5 &= \Phi_4 + \Phi_V = 21930 \\ \Phi_6 &= \Phi_5 + \Phi_{VI} = 29930. \end{aligned}$$

Aus der Magnetisierungskurve $aw = f(B_w)$ S. 280, Bd. I entnimmt man die den Amperewindungen pro Zentimeter $aw_p = 683$ entsprechende Induktion $B_p = 22000$, und wir finden dann in

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{\Phi_1}{B_p} = \frac{3770}{22000} = 0{,}171 \text{ cm}^2 \\ Q_2 &= \frac{\Phi_2}{B_p} = \frac{7550}{22000} = 0{,}343 \text{ cm}^2 \\ Q_3 &= \frac{\Phi_3}{B_p} = \frac{111300}{22000} = 0{,}506 \text{ cm}^2 \\ Q_4 &= \frac{\Phi_4}{B_p} = \frac{15680}{22000} = 0{,}712 \text{ cm}^2 \\ Q_5 &= \frac{\Phi_5}{B_p} = \frac{21930}{22000} = 0{,}99 \text{ cm}^2 \\ Q_6 &= \frac{\Phi_6}{B_p} = \frac{29930}{22000} = 1{,}36 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Digitized by Google

die Querschnitte der Polspitze an den verschiedenen Stellen pro 1 cm Ankerlänge. Von diesen Querschnitten ausgehend wird nun die endgültige obere Begrenzungslinie der Polspitze eingezeichnet (in Fig. 366 ist die Polspitze in halber natürlicher Größe dargestellt); hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Hälfte der Bleche nach pq abgeschnitten ist, und daß der Polschuh aus 1 mm starken Blechen zusammengesetzt ist, so daß man $k_2 = 0{,}95$ setzen kann.

Ist der Kraftfluß durch die Röhren I' und II' festgelegt, so kann man nach der Formel 125, S. 300 annähernd den Kraftfluß durch die Röhren I bis VI bestimmen. Der Kraftfluß pro 1 cm Ankerlänge für die Röhren I' und II' ergibt sich zu:

$$\Phi_I' + \Phi_{II}' = AW_I \lambda_I' + AW_{II} \lambda_{II}' =$$
$$= 2605 \cdot 0{,}7 + 3285 \cdot 0{,}35 = 2970.$$

Der Kraftfluß pro 1 cm Ankerlänge für die Röhren I bis VI ergibt sich annähernd zu:

$$\Phi_{I \text{ bis } VI} = 3{,}75 - \frac{AW_l + AW_z - \frac{1}{2} AW_p}{(2\delta + \delta_1)(k_z + k_1)} b_{I \text{ bis } VI} =$$

$$= 3{,}75 \frac{10\,100 + 2880 - 4100}{(2 \cdot 0{,}6 + 2{,}35)(1{,}23 + 1{,}19)} 6{,}5 = 25\,200.$$

Nach dieser Rechnung wird somit

$$\Phi_6 = 25\,200 + 2970 = 28\,170.$$

Wie man sieht, stimmt der so erhaltene Kraftfluß annähernd mit dem genau berechneten überein. Durch die Spitze tritt in den Anker der Kraftfluß

$$\Phi_p = l_i \Phi_6 = 36 \cdot 29\,930 = 1{,}07 \cdot 10^6$$

ein. Ist Φ der totale Kraftfluß pro Pol bei Leerlauf, so ergibt sich der Kraftfluß, der durch die Fläche bl_i in den Anker eintritt, zu

$$\Phi - \Phi_p = (13{,}6 - 1{,}07)\, 10^6 = 12{,}53 \cdot 10^6.$$

Der konzentrische Teil des Polbogens wird also

$$b = \frac{\Phi - \Phi_p}{B_l l_i} = \frac{12{,}53 \cdot 10^6}{8630 \cdot 36} = 40{,}5 \text{ cm}.$$

Nachdem der Polschuh vollständig bekannt ist, kann jetzt die Feldkurve bei Leerlauf (Kurve I, Fig. 368) aufgezeichnet werden. Unter dem konzentrischen Teil der Feldkurve hat die Feldstärke den konstanten Wert $B_{l_0} = 8630$. An der Eintrittseite sind die

Digitized by Google

Kraftflüsse Φ_I, Φ_{II}, Φ_{III} der einzelnen Röhren bekannt, woraus sich die Feldstärken

$$B_I = 1260; \qquad B_{II} = 2190.$$

unter der Polspitze ergeben, während die Feldstärken B_{III}, B_{IV}, B_V, B_{VI} bereits früher gefunden wurden (S. 339).

Für die ungesättigte Polspitze der Austrittseite werden die Feldstärken in gewöhnlicher Weise (s. S. 320, Bd. I) durch Aufzeichnen der Kraftröhren ermittelt.

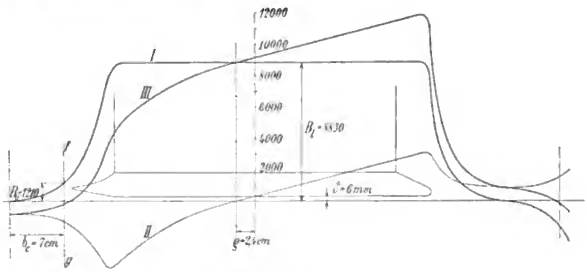


Fig. 368. Feldkurven.

Um die Feldkurve bei Belastung zu bestimmen, nehmen wir vorläufig an, daß die neutrale Zone des Zusatzfeldes mit der Polschuhmitte zusammenfällt. Die Feldstärke an der Eintrittseite ist bei Belastung so stark geschwächt, daß die Polspitze als ungesättigt angesehen werden kann, da

$$\frac{1}{2} AW_p = 0{,}375\, b_i AS < 0{,}5\, b_i AS \text{ ist.}$$

Die magnetische Potentialdifferenz zwischen einem Punkte des Polschuhs und dem gegenüberliegenden Punkte des Zahnfußes ist bei Leerlauf gleich $\frac{1}{2}(AW_{lo} + AW_{zo})$ und bei Belastung gleich $\frac{1}{2}(AW_{lo} + AW_{zo}) + (b_z - b_y) \cdot AS = 6365 + (b_z - b_y) \cdot 248$ (s. Fig. 288, S. 325, Bd. I). Trägt man nun in die Übertrittscharakteristik (Fig. 367) die an irgend einem Orte herrschende magnetische Potentialdifferenz bezw. Amperewindungszahl ein, so gibt uns die zugehörige Ordinate die in diesem Punkte auftretende Feldstärke. Der unter dem konzentrischen Teil des Polschuhs gelegene Teil der Feldkurve *III* entspricht somit dem Teil *mn* der Übertrittscharakteristik (Fig. 367).

Digitized by Google

Für die Polspitze bestimmen wir das Feld bei Belastung, indem wir die MMK $= \frac{1}{2}(AW_{lo} + AW_{ro}) + (b_z - b_y)AS$ auf die Abszissenachse der Leerlaufcharakteristik auftragen und aus den Endpunkten dieser Strecken Parallele zu den zugehörigen δ_x-Strahlen ziehen. Die Schnittpunkte dieser Geraden mit der Übertrittscharakteristik geben uns dann die Induktionen.

Zur Ermittlung der Feldstärke im Raume zwischen den Polen wird zuerst das Zusatzfeld (angenähert das Ankerfeld) aufgezeichnet. Die Feldstärke dieses Zusatzfeldes berechnet sich wie folgt (vergl. Fig. 288, S. 325, Bd. I):

$$B_q = B_{q1} + B_{q2} = \frac{AS(b_z \mp b_y) - \frac{1}{2} AW_p}{0{,}8 \cdot xc} + \frac{AS(\tau - b_z \pm b_y)}{0{,}8 \cdot xf}.$$

Für Punkte links von der Bürstenmitte f—g (Fig. 368) ist für b_y das untere, für Punkte rechts von der Bürstenmitte ist für b_y das obere Vorzeichen gültig.

In dieser Weise bestimmen wir denjenigen Teil der Feldkurve *II* des Ankerfeldes, der zwischen den Polen liegt. Die Ordinaten der Kurve *II* addieren wir zu denen der Kurve *I* und erhalten die Feldkurve zwischen den Polen bei Belastung (*III* in Fig. 368).

Planimetriert man die Feldkurve bei Belastung, so ergibt sich der gleiche Inhalt wie für die Feldkurve bei Leerlauf. Dieses Resultat wurde nicht gleich erhalten, sondern es wurden verschiedene neutrale Zonen des Ankerfeldes angenommen und die Feldkurve bei Belastung konstruiert. Es zeigte sich, daß für $\varrho = 2{,}4$ cm der Inhalt der Feldkurven bei Leerlauf und Belastung gleich wird.

Für die angenommene Bürstenstellung ergibt sich eine Leitfähigkeit

$$\lambda_q = \frac{B_y}{2AS} = \frac{1400}{2 \cdot 248} = 2{,}88,$$

welche fast mit dem angenommenen Wert $\lambda_q = 3{,}05$ übereinstimmt.

Die Amperewindungen bei Belastung sind nach dieser Feldkurve gleich

$$\begin{aligned} AW_k &= AW_{ko} + AW_{mb} - AW_{mo} + AW_{jb} - AW_{jo} + 2(b_c + \varrho)AS \\ &= 16320 + (2420 - 1800) + (1440 - 1140) + 2(7{,}0 + 2{,}4)248 \\ &= 16320 + 620 + 300 + 4660 = 21900. \end{aligned}$$

Dieser Wert weicht von dem früher berechneten Wert $AW_k = 20925$

Digitized by Google

(S. 326) ab,[1]) so daß nun die Hauptschlußwicklung nochmals geprüft werden muß.

Die Amperewindungszahl pro Pol beträgt jetzt:

$$\frac{AW_h}{2p} = \frac{6}{12}(21900 - 16320) = \frac{6}{12} \cdot 5580 = 2790.$$

Es sind somit pro Pol für die Hauptschlußwicklung $\frac{2790 \cdot 4}{910} \simeq 12{,}5$ Windungen erforderlich. Es wird sich jedoch bei der Ausführung empfehlen, die Windungen auf 13,5, also $w_h = 12 \cdot 13{,}5 = 162$, zu erhöhen. Die eventuelle Überkompoundierung der Maschine kann alsdann nachträglich durch eine Nebenschließung ausgeglichen werden.

Wegen des beschränkten Wicklungsraumes ändern wir nun die Querschnittsdimensionen auf $5{,}4 \times 2{,}7$ mm ab und erhalten:

$$q_h = 146 \text{ mm}^2,$$

$$s_h = \frac{910}{4 \cdot 146} = 1{,}56 \text{ Amp./mm}^2$$

In Fig. 363, S. 328 sind die richtigen Abmessungen der Hauptschlußwicklung eingezeichnet.

Infolge der Erhöhung der Hauptschlußwindungen verändert sich auch das Kupfergewicht der letzteren, welches jetzt:

$$w_h \, l_h \, q_h \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 162 \cdot 130 \cdot 146 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 275 \text{ kg}$$

beträgt.

Es wird alsdann (vergl. S. 335):

$$G_{km} = 735 + 275 = 1010 \text{ kg}$$

$$G_k = G_{ka} + G_{km} = 700 + 1010 = 1710 \text{ kg}$$

$$\Sigma(G_k) = G_{ka} + G_{km} + G_{kk} = 700 + 1010 + 275 = 1985 \text{ kg}$$

$$\frac{G_{km}}{G_{ka}} = \frac{1010}{700} = 1{,}44.$$

Auf Grund der vorgenommenen Änderungen ergeben sich ferner folgende Werte:

$$R_h = \frac{1}{4} \cdot \frac{1{,}2 \cdot 130}{5700} \cdot \frac{162}{4 \cdot 146} = 0{,}0019 \, \Omega$$

$$W_H = 910^2 \cdot 0{,}0019 = 1570 \text{ Watt}$$

[1]) Die Differenz zwischen den Werten von AW_h rührt daher, daß bei der ersten Berechnung AW_r zu klein eingeführt wurde.

Digitized by Google

$$a_m = \frac{52\,500}{1570 + 4260} = 9 \frac{\text{cm}^2}{\text{Watt}}$$

$$T_m = \frac{500}{9{,}5} = 55{,}5^0 \text{ C.}$$

$$W_v = 38\,705 \text{ Watt}$$

$$\eta = \frac{500\,000}{538\,320} = 92{,}8\,\%.$$

75. Nachrechnung eines Doppelschlußgenerators mit Wendepolen, 650 KW, 100 Umdr. pro Min.

Wir nehmen an, das Modell der im ersten Beispiel berechneten Maschine sei vorhanden und die Maschine soll für die gleiche Klemmenspannung und Umdrehungszahl unter entsprechender Erhöhung der Leistung mit Wendepolen ausgerüstet werden.

Die Maschinenleistung kann auf mindestens 650 KW bei 100 Umdr. pro Min. erhöht werden. Wir werden uns im Nachfolgenden auf die Nachrechnung beschränken, indem wir die Verhältnisse, welche sich bei der Durchrechnung ergaben, als bekannt voraussetzen.

Der äußere Ankerdurchmesser wurde um 2 cm vergrößert und die Polkerne dementsprechend kürzer gemacht. Bei langsam laufenden Maschinen genügt es, die Zahl der Wendepole gleich der halben Zahl der Hauptpole zu machen.[1]) Die Vorteile, die man dadurch erreicht, sind kleinerer Kupferverbrauch und größere Stabilität des Wendefeldes.

Die **Abmessungen** ergaben sich wie folgt:[2])

Außendurchmesser des Ankers	$D = 242$ cm
Innendurchmesser des Ankers	$D_i = 196{,}4^*$ cm
Länge des Ankers mit Luftschlitzen	$l_1 = 36^*$ „
Länge des Ankereisens ohne Luftschlitze	$l = 32$ „
Anzahl der Luftschlitze	4 à 1 „
Luftraum, einseitig	$\delta = 0{,}5$ „
Anzahl der Pole	$2p = 12^*$
Ideeller Polbogen	$b_i = 43$ cm
Durchmesser des Magnetschenkels	$D_m = 36^*$ „
Höhe des Magnetschenkels ohne Polschuh	$= 24$ „
Jochquerschnitt	$Q_j = 594^* \text{cm}^2$
Anzahl der Wendepole	6

[1]) D. R. P. des Verfassers 179282.

[2]) Die mit * versehenen Abmessungen stimmen mit denjenigen des Beispiels I überein.

Digitized by Google

Polbogen des Wendepolschuhes . . . . . $b_w = 5{,}6$ cm
Länge des Wendepolschuhes . . . . . $l_w = 36$ „
Querschnitt des Wendepolschenkels . . . . . $Q_{w\,m} = 160$ cm²
Luftraum unter dem Wendepol . . . . . $\delta_w = 0{,}5$ cm

Ankerwicklung:

Anzahl der Nuten . . . . . $Z = 410$
Abmessungen der Nuten . . . . . $7{,}5 \times 45$ mm
Stäbe pro Nut . . . . . $u_n = 2$
Abmessungen der Stäbe . . . . . $\frac{5 \times 19}{5{,}8 \times 19{,}8}$ mm
Reihenparallelwicklung mit . . . . . $a = 2$.

Magnetwicklung der Hauptpole.

1. Nebenschlußwicklung:

Pro Spule . . . . . 1060 Windungen
Drahtdurchmesser . . { 530 Windungen 2,3/2,7
530 Windungen 2,4/2,8
Schaltung der Spulen: Serie.

2. Hauptschlußwicklung:

Pro Spule . . . . . 6 Windungen
Abmessungen des Leiters: . . . . . Kupferband $4{,}7 \times 75$ mm
Schaltung der Spulen: 2 parallele Zweige à 6 Spulen in Serie.

Magnetwicklung der Wendepole:

Pro Spule . . . . . 12 Windungen
Abmessungen des Leiters . . . . . 17×35 mm
Schaltung der Spulen: Serie.

Kommutator:

Durchmesser . . . . . $D_k = 100$ cm
Länge . . . . . $L_k = 18^*$ „
Lamellenzahl . . . . . $K = 410$
Anzahl der Bürstenstifte 12*
Bürsten pro Stift 5*
Bürstenabmessungen . . . . . $2 \times 3^*$ cm

Die weiteren Abmessungen sind aus Fig. 369 ersichtlich.

Nachrechnung der Maschine. 650 KW, 100 Touren, 550 Volt.

Stromstärke der Maschine:

$$J_a = \frac{650 \cdot 1000}{550} = 1180 \text{ Amp.}$$

Digitized by Google

Ideelle Ankerlänge:

$$l_i = l_1 - \frac{1}{3} n_s b_s = 36 - \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 1 \cong 34{,}7 \text{ cm}.$$

Maschinenkonstante:

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{242^2 \cdot 34{,}7 \cdot 100}{650} = 31{,}5 \cdot 10^4.$$

Polteilung:

$$\tau = \frac{\pi D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 242}{12} = 63{,}2 \text{ cm}$$

$$\alpha_i = \frac{b_i}{\tau} = \frac{43}{63{,}2} = 0{,}68.$$

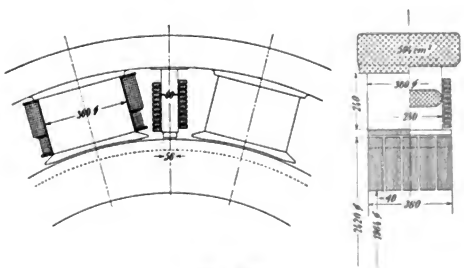


Fig. 369.

Umfangsgeschwindigkeit des Ankers:

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 100} = 12{,}6 \text{ m/sec}.$$

Ankerwicklung.

Anzahl der Stäbe $= u_n Z = 2 \cdot 410 = 820$.

Kommutatorschritt:

$$y_k = \frac{K \pm a}{p} = \frac{410 - 2}{6} = 68.$$

Teilschritte: y_1 (Spulenweite) $= 69$; $y_2 = 67$.

Stromstärke pro Ankerzweig:

$$i_a = \frac{J_a}{2 \cdot a} = \frac{1180}{2 \cdot 2} = 295.$$

Stabquerschnitt:

$$q_a = 5 \cdot 19 = 95 \text{ mm}^2.$$

Digitized by Google

Stromdichte im Ankerstab:

$$s_a = \frac{i_a}{q_a} = \frac{295}{95} = 3{,}1 \text{ Amp/mm}^2.$$

Spezifische Ankerbelastung:

$$AS = \frac{i_a N}{\pi D} = \frac{295 \cdot 820}{\pi \cdot 242} = 318.$$

Länge einer halben Ankerwindung:

$$l_a \cong l_1 + 1{,}4\,\tau + 5 \text{ cm} = 36 + 1{,}4 \cdot 63{,}2 + 5 = 129 \text{ cm}.$$

Ankerwiderstand warm:

$$R_a = \frac{l_a N}{(2a)^2 \cdot 5700 \cdot q_a}(1 + 0{,}004\,T_a) = \frac{129 \cdot 820}{16 \cdot 5700 \cdot 95} 1{,}2 = 0{,}0146\ \Omega$$

Induktionen bei Leerlauf.

Kraftfluß bei Leerlauf:

$$\Phi = P \frac{a}{N} \frac{60}{pn} 10^8 = \frac{550 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 10^8}{820 \cdot 3 \cdot 100} = 13{,}4 \cdot 10^6.$$

Luftinduktion:

$$B_l = \frac{\Phi}{l_i b_i} = \frac{13{,}4 \cdot 10^6}{34{,}7 \cdot 43} = 8980.$$

	Am Kopf	In der Mitte	Am Fuß
Zahnteilung	18,5	18,2	17,9
Zahnbreite	11,0	10,7	10,4
Ideelle Zahninduktion . . .	18200	18700	19200

Induktion im Ankereisen:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot k_2\, l\, h} = \frac{13{,}4 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 32 \cdot 18{,}1} = 12800.$$

Kraftfluß im Hauptpol bei Leerlauf:

$$\Phi_m = \sigma\, \Phi \cong 1{,}18 \cdot 13{,}4 \cdot 10^6 = 15{,}8 \cdot 10^6.$$

Querschnitt des Magnetschenkels:

$$Q_m = \frac{\pi}{4} D_m{}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 36^2 = 1017{,}9 \text{ cm}^2.$$

Magnetinduktion:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{1017{,}9} = 15500.$$

Digitized by Google

Jochinduktion:

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 \cdot Q_j} = \frac{15{,}8 \cdot 10^6}{2 \cdot 594} = 13300.$$

Kommutator:

$$D_k = 100\text{ cm}, \quad L_k = 18\text{ cm}, \quad K = 410.$$

Lamellenteilung:

$$\beta = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 100}{410} = 7{,}65\text{ mm}.$$

Umfangsgeschwindigkeit:

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60 \cdot 100} = \frac{\pi \cdot 100 \cdot 100}{60 \cdot 100} = 5{,}25\text{ m/sec}.$$

Totale Bürstenfläche:

$$F_b = 12 \cdot 5 \cdot 6 = 360\text{ cm}^2.$$

Stromdichte unter den Bürsten:

$$s_u = \frac{2 J_a}{F_b} = \frac{2 \cdot 1180}{360} = 6{,}55.$$

Übergangsverlust:

$$W_u = 2 \Delta P f_u J_a = 1{,}5 \cdot 1180 = 1770\text{ Watt}.$$

Reibungsverlust:

$$W_r = 9{,}81 \cdot v_k F_b g \varrho = 9{,}81 \cdot 5{,}25 \cdot 360 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}25 = 695\text{ Watt}.$$

Totaler Kommutatorverlust:

$$W_u + W_r = 1770 + 695 = 2465\text{ Watt}.$$

Spezifische Abkühlungsfläche:

$$a_k = \frac{\pi D_k L_k}{W_u + W_r} (1 + 0{,}1 v_k) = \frac{\pi \cdot 100 \cdot 18}{2465} 1{,}525 = 3{,}5\text{ cm}^2/\text{Watt}.$$

Temperaturerhöhung des Kommutators:

$$T_k = \frac{C}{a_k} = \frac{100}{3{,}5} \sim 29^0\text{ C}.$$

Induktionen bei Vollast.

Mittlere Windungslänge der Hauptschlußwicklung $l_H = 126$ cm.

Widerstand der Hauptschlußwicklung:

$$R_h = \frac{l_h w_h}{5700 \cdot q_h} \cdot (1 + 0{,}004 T_m) = \frac{127 \cdot 42}{5700 \cdot 704} 1{,}2 = 0{,}0016\ \Omega.$$

Mittlere Windungslänge der Wendepolwicklung $l_c = 80$ cm.

Widerstand der Wendepolwicklung:

$$R_c = \frac{l_c w_c}{5700 \cdot q_c} (1 + 0{,}004 T_c) = \frac{80 \cdot 60}{5700 \cdot 595} \cdot 1{,}2 = 0{,}0017\ \Omega.$$

Digitized by Google

Totaler Widerstand der Anker-, der Hauptschluß- und der Wendepolwicklung:

$$R_a + R_h + R_c = 0{,}0146 + 0{,}0014 + 0{,}0017 \simeq 0{,}018\ \Omega.$$

Ohm'scher Spannungsabfall:

$$J_a (R_a + R_h + R_c) = 1180 \cdot 0{,}018 = 21{,}2 \text{ Volt.}$$

Induzierte EMK bei Vollast:

$$E_a = 550 + 21{,}2 + 1{,}8 = 573 \text{ Volt,}$$

wobei der Spannungsabfall unter den Bürsten gleich 1,8 Volt gesetzt ist.

Kraftfluß bei Vollast:

$$\Phi_b = E_a \frac{a}{N} \frac{60}{pn} 10^8 = \frac{573 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 10^8}{820 \cdot 3 \cdot 100} = 14 \cdot 10^6.$$

Luftinduktion:

$$B_l = \frac{\Phi_b}{l_i b_i} = \frac{14 \cdot 10^6}{34{,}7 \cdot 43} = 9380.$$

Ideelle Zahninduktionen:

Am Kopf	19000
In der Mitte . . .	19500
Am Fuß	20100

Induktion im Ankereisen bei unerregten Wendepolen:

$$B_a = \frac{\Phi_b}{2 \cdot k_2 \, l \, h} = \frac{14 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 32 \cdot 18{,}1} = 13400.$$

Kraftfluß im Hauptmagnet bei Vollast:

$$\Phi_m = \sigma \, \Phi_b \sim 1{,}18 \cdot 14 \cdot 10^6 = 16{,}5 \cdot 10^6.$$

Magnetinduktion:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{16{,}5 \cdot 10^6}{1017{,}9} = 16200.$$

Jochinduktion bei unerregten Wendepolen:

$$B_j = \frac{\Phi_j}{2 \cdot Q_j} = \frac{16{,}5 \cdot 10^6}{2 \cdot 594} = 13900.$$

Wendepole.

Leitfähigkeiten des Streukraftflusses (siehe Fig. 370):

$$\lambda_n = 1{,}25 \left(\frac{r}{3 \, r_3} + \frac{r_5}{r_3} \right) = 1{,}25 \left(\frac{9}{3 \cdot 7{,}5} + \frac{14}{7{,}5} \right) = 3{,}4.$$

$$\lambda_{ks} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi l_1}{2 r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 18{,}5}{2 \cdot 7{,}5} = 0{,}53$$

Fig. 370.

Digitized by Google

$$\lambda_s = 0{,}8; \quad l_s = 93; \quad \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 2{,}14$$

$$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 3{,}4 + 0{,}53 + 1{,}07 = 5{,}0.$$

Aus der Aufzeichnung der Kraftlinien ergibt sich $\lambda_{q\,o} = 1{,}88$.
Feldstärke unter dem Wendepol:

$$B_{wl} = \frac{2\,t_1\,A\,S\,\lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \frac{2\,l_1}{l_w} + 2\,A\,S\,\lambda_{q\,o} \frac{2\,l_1 - l_w}{l_w} =$$

$$= \frac{2 \cdot 18{,}5 \cdot 318 \cdot 5{,}0}{18{,}5 + 48{,}4 - 6{,}2} 2 + 2 \cdot 318 \cdot 1{,}88 = 3140.$$

Breite der Kommutierungzone:

$$t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D = 18{,}5 + 48{,}4 - 6{,}2 = 60{,}7 \text{ mm}.$$

Breite des Wendepoles:

$$b_w = 56 \text{ mm} \simeq 3\,t_1.$$

Ideeller Polbogen des Wendepoles:

$$b_{wi} = b_w + 4{,}5\,\delta_w = 5{,}6 + 4{,}5 \cdot 0{,}5 = 7{,}85 \text{ cm}.$$

Ideelle Wendepollänge:

$$l_{wi} = l_i = 34{,}7 \text{ cm}.$$

Kraftfluß des Wendepols:

$$\Phi_{wa} = B_{wl}\,b_{wi}\,l_{wi} = 3140 \cdot 7{,}85 \cdot 34{,}7 = 0{,}86 \cdot 10^6$$
$$\Phi_{wm} = \sigma_k\,\Phi_{wa} = 1{,}8 \cdot 0{,}86 \cdot 10^6 = 1{,}56 \cdot 10^6.$$

Es ergeben sich jetzt folgende Kraftflüsse:

$$\Phi_j' = \frac{\Phi_m + \Phi_{wm}}{2} = \frac{16{,}5 + 1{,}56}{2} \cdot 10^6 = 9{,}03 \cdot 10^6$$

$$\Phi_j'' = \frac{\Phi_m - \Phi_{wm}}{2} = \frac{16{,}5 - 1{,}56}{2} \cdot 10^6 = 7{,}47 \cdot 10^6$$

$$\Phi_a' = \frac{\Phi + \Phi_{wa}}{2} = \frac{14 + 0{,}86}{2} \cdot 10^6 = 7{,}43 \cdot 10^6$$

$$\Phi_a'' = \frac{\Phi - \Phi_{wa}}{2} = \frac{14 - 0{,}86}{2} \cdot 10^6 = 6{,}57 \cdot 10^6$$

$$\Phi_m' = \Phi_m + \frac{\Phi_{wm}}{2} = \left(16{,}5 + \frac{1{,}56}{2}\right) \cdot 10^6 = 17{,}28 \cdot 10^6$$

$$\Phi_m'' = \Phi_m - \frac{\Phi_{wm}}{2} = \left(16{,}5 - \frac{1{,}56}{2}\right) \cdot 10^6 = 15{,}72 \cdot 10^6$$

Digitized by Google

$$\Phi_l' = \Phi + \frac{\Phi_{we\,a}}{2} = \left(14 + \frac{0{,}86}{2}\right) \cdot 10^6 = 14{,}43 \cdot 10^6$$

$$\Phi_l'' = \Phi - \frac{\Phi_{we\,a}}{2} = \left(14 - \frac{0{,}86}{2}\right) \cdot 10^6 = 13{,}57 \cdot 10^6.$$

Hieraus ergeben sich noch folgende Induktionen:

$B_j' = 15200$	$B_j'' = 12600$
$B_a' = 14300$	$B_a'' = 12600$
$B_m' = 16900$	$B_m'' = 15400$
$B_l' = 9700$	$B_l'' = 9120$
$B_z' = \begin{cases} 19600 \\ 20200 \\ 20800 \end{cases}$	$B_z'' = \begin{cases} 18400 \\ 19000 \\ 19600 \end{cases}$
$B_{we\,m} = 9750$	$B_{we\,z\,mittel} = 6500.$

Kraftlinienlängen der verschiedenen Kreisteile:

$\delta = 0{,}5$ cm; $k_1 = 1{,}12$ cm; $L_z = 9$ cm; $L_m = 60$ cm;

$L_a = 55$ cm; $L_j = 76$ cm; $\frac{1}{2} L_{we\,m} = 30$ cm.

Amperewindungen:

$$AW_j' = 36 \cdot 38 = 1370$$
$$AW_a' = 19 \cdot 27{,}5 = 525$$
$$AW_m' = 71 \cdot 30 = 2130$$
$$AW_l' = 0{,}8 \cdot 1{,}12 \cdot 0{,}5 \cdot 9700 = 4350$$
$$AW_z' = 265 \cdot 4{,}5 = 1190$$
$$\Sigma AW' = 9565$$

$$AW_j'' = 16 \cdot 38 = 610$$
$$AW_a'' = 10 \cdot 27{,}5 = 275$$
$$AW_m'' = 39 \cdot 30 = 1170$$
$$AW_l'' = 0{,}8 \cdot 1{,}12 \cdot 0{,}5 \cdot 9120 = 4100$$
$$AW_z'' = 150 \cdot 4{,}5 = 675$$
$$\Sigma AW'' = 6830$$

$$AW_{we\,l} = 0{,}8 \cdot 1{,}12 \cdot 0{,}5 \cdot 3140 = 1410$$
$$AW_{we\,m} = 7{,}4 \cdot 30 = 225$$
$$AW_{we\,z} = 1{,}1 \cdot 4{,}5 = 5$$
$$\Sigma AW_{we} = 1640$$

Für geradlinige Kommutation erforderliche Amperewindungen eines Wendepoles:

$$AW_N + \frac{\tau}{2} AS = \frac{\Sigma AW' - \Sigma AW''}{2} + \Sigma AW_{we} + \frac{\tau}{2} AS =$$

$$= \frac{9565 - 6830}{2} + 1640 + \frac{63{,}2}{2} \cdot 318 = 3010 + 10080 = 13090$$

Digitized by Google

Vorhandene Amperewindungszahl pro Pol (s. S. 345):

$$1180 \cdot 10 = 11800.$$

Diese ist kleiner als die für geradlinige Kommutation erforderliche und es ist später zu prüfen, ob die hierdurch hervorgerufene fehlerhafte Feldstärke zulässig ist.

Spezifische Abkühlungsfläche

$$a_c = 12{,}5 \text{ cm}^2/\text{Watt};$$

Temperaturerhöhung der Wendepolwicklung

$$T_c = \frac{600}{12{,}5} \backsim 50^0 \text{ C}.$$

Nebenschlußwicklung. Totale Amperewindungen bei Leerlauf:

$$AW_{l0} = 81000.$$

Mittlere Windungslänge der Nebenschlußwicklung:

$$l_n = \pi \cdot 42 = 132 \text{ cm}.$$

Querschnitt der Nebenschlußwicklung:

$$q_n = \frac{AW_{l0}\, l_n}{5700 \cdot P} (1 + 0{,}004\, T_m)(1{,}05 \div 1{,}1) =$$

$$= \frac{81000 \cdot 132}{5700 \cdot 500} 1{,}2 \cdot 1{,}07 = 4{,}35 \text{ mm}^2.$$

Wir haben pro Pol 530 Windungen mit ϕ 2,3/2,7 mm (Querschnitt 4,15 mm²) und 530 Windungen mit ϕ 2,4/2,8 mm (Querschnitt 4,55 mm²). Es ist somit der mittlere Querschnitt:

$$q_n = \frac{4{,}15 + 4{,}45}{2} = 4{,}35 \text{ mm}^2,$$

also gleich dem erforderlichen.

Nebenschlußstromstärke bei Leerlauf: $i_{n0} = 6{,}35$ Amp.
Stromdichte: $s_n = 1{,}46$ Amp/mm².
Widerstand der Nebenschlußwicklung (warm): $R_n = 81{,}5\ \Omega$
Spezifische Abkühlungsfläche der Magnetspulen: $a_m = 10{,}8$ cm²/Watt.
Temperaturerhöhung: $T_m \backsim 56^0$ C.

Hauptschlußwicklung. Amperewindungen pro Kreis bei Vollast, ausschließlich der entmagnetisierenden Amperewindungen:

$$\Sigma AW' + \Sigma AW'' = 16395.$$

Digitized by Google

Da die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone stehen, haben wir hier nur die entmagnetisierende Wirkung durch die Quermagnetisierung, zu berücksichtigen.[1])

Diese Amperewindungen lassen sich mit genügender Genauigkeit nach der auf Seite 312, Bd. I beschriebenen Methode aus der Übertrittcharakteristik bestimmen. In Fig. 371 ist die Übertrittcharakteristik aufgezeichnet.

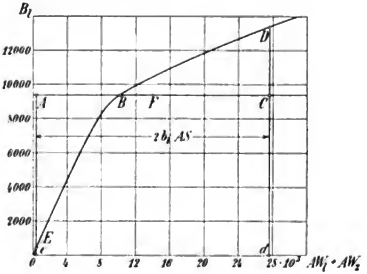


Fig. 371.

Die Gerade AC entspricht dem oben für Vollast gerechneten Wert $B_l = 9380$, welcher sich aus der Formel $\Phi_b = B_l\, l_i\, b_i$ ergibt. Die Lage von A und C auf dieser Geraden ist so gewählt, daß $\overline{AC} = 2 \cdot b_i\, AS$ ist und die Fläche $AEBA$ gleich der Fläche $BCDB$ ist. Es liegt F in der Mitte zwischen A und C und $\overline{BF}$ ist somit gleich der Zahl der entmagnetisierenden Amperewindungen pro Kreis. Diese ergeben sich zu ca. 4000.

Somit erhalten wir die totalen Amperewindungen bei Vollast

$$AW_t = p\, AW_k = 6 \cdot (16395 + 4000) = 122400,$$

und die totalen Amperewindungen bei Leerlauf $AW_{to} = 81000$.

Die Hauptschlußwicklung muß somit $122400 - 81000 = 41400$ Amperewindungen liefern.

Windungen der Hauptstromwicklung:

$$w_h = \frac{41400}{1180} \simeq 35.$$

Schaltet man die Spulen in zwei parallele Kreise, so wird die Windungszahl pro Spule $\frac{35}{6} \simeq 6$.

Querschnitt der Hauptschlußwicklung: $q_h = 2 \cdot 352\ \text{mm}^2$.

Stromdichte: $s_h = 1{,}46\ \text{Amp/mm}^2$.

Widerstand der Hauptschlußwicklung (warm): $= 0{,}0014\ \Omega$.

Spezifische Abkühlungsfläche: $a_h = 12\ \text{cm}^2/\text{Watt}$.

Temperaturerhöhung: $\simeq 50^0$ C.

[1]) Im allgemeinen stehen die Bürsten nicht genau in der neutralen Zone. Werden sie in der Drehrichtung verstellt, so wirkt ein Teil des Wendefeldes gegenkompoundierend und ein Teil der Ankeramperewindungen entmagnetisierend. Die Erregung muß dann entsprechend erhöht werden.

Digitized by Google

Verluste. Die Eisenverluste wurden mit den Induktionen, die bei unerregten Wendepolen auftreten, der Hysteresiskonstante $\sigma_h = 2$, und der Wirbelstromkonstante $\sigma_w = 15$ gerechnet.

Es ergaben sich:

Eisenverluste	W_e	= 8670	Watt
Stromwärmeverluste in der Ankerwicklung . .	W_{ka}	= 20300	„
Kommutatorverluste	$W_u + W_r$	= 2465	„
Verlust im Nebenschlußkreis	W_n	= 3175	„
Stromwärmeverlust in der Wendepolwicklung .	W_c	= 2370	„
Stromwärmeverlust in der Hauptschlußwicklung	W_H	= 1950	„
Lager- und Luftreibung	W_l	= 5000	„
Totale Verluste	W_v	= 43390	Watt

Wirkungsgrad bei Vollast $\eta = 93{,}7\,\%$.

Abkühlung des Ankers. Die spezifischen Abkühlungsflächen des Ankers ergeben sich zu:

$a_a = 7{,}95$ cm²/Watt; $a_{st} = 7{,}45$ cm²/Watt; $a_e = 30{,}8$ cm²/Watt.

Bei guter Ventilation des Ankers wird die Temperaturerhöhung 50° C nicht überschreiten. Wählen wir die Abkühlungskonstante $C_a = 350$, so wird die Temperaturerhöhung ca. 44° C.

Nachrechnung der Maschine auf Kommutierung. Wir zeichnen die Magnetisierungskurve des Wendepolkreises auf, indem wir für verschiedene Luftinduktionen unter dem Wendepol B_{wl} die Amperewindungen suchen, die erforderlich sind, um diese Induktionen zu erzeugen.

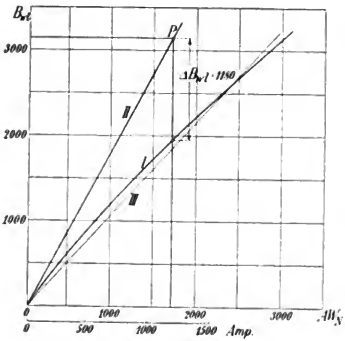


Fig. 372.

Für eine Induktion $B_{wl} = 3140$ wurde die Rechnung auf Seite 350 durchgeführt. Wir fanden $AW_N = 3010$. Die Kurve *I* Fig. 372 stellt die so berechnete Magnetisierungskurve dar. Jede Amperewindungszahl AW_N entspricht einem bestimmten Belastungsstrom. Bei einem Belastungsstrom von 1000 Amp. z. B. ist die Amperewindungszahl auf einem Wendepol $1000 \cdot 10 = 10000$, die Ampere-

Digitized by Google

windungszahl $\frac{\tau}{2} \cdot AS = \frac{63{,}2}{2} \cdot 269 = 8550$ (bei $J = 1000$ $AS = 269$) und somit $AW_N = 1000 - 8550 = 1450$. Da ferner AW_N und J proportional sind, so können wir auch die vorhandene Induktion B_{wl} in Abhängigkeit vom Belastungsstrom J darstellen, indem wir einen neuen Abszissenmaßstab zufügen.

Die für eine geradlinige Kommutation erforderliche Induktion B_{wl}, welche nach der Formel

$$B_{wl} = \frac{2\, t_1\, AS\, \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \frac{2\, l_1}{l_w} + 2\, AS\, \lambda_{q0} \frac{2\, l_1 - l_w}{l_w}$$

gerechnet wird, ist AS und somit dem Belastungsstrom J proportional. Bei Vollast ($J = 1180$) fanden wir (s. S. 350) die erforderliche Induktion gleich 3140. Tragen wir somit den Punkt $J = 1180$, $B_{wl} = 3140$ in Fig. 372 ein (Punkt P) und ziehen wir durch P und O eine Gerade, so gibt uns diese Gerade für jeden Belastungsstrom die für eine geradlinige Kommutation erforderliche Induktion B_{wl}. Die Ordinatendifferenz der Kurven I und II gibt uns die fehlerhafte Induktion ΔB_{wl}. Wie Fig. 372 zeigt, ist bei Vollast $\Delta B_{wl} = 1180$; für kleinere Belastungen wird der Fehler kleiner.

Durch diesen Fehler wird eine Kurzschlußspannung induziert

$$\Delta e_w = S_k \frac{N}{K} l_{wi}\, v\, \Delta B_{wl} \cdot 10^{-6} = 9 \cdot 2 \cdot 34{,}7 \cdot 12{,}6 \cdot 1180 \cdot 10^{-6} =$$
$$= 9{,}3 \text{ Volt}$$

Dieser Wert bleibt unter der zulässigen Grenze. Nehmen wir 11 anstatt 10 Windungen pro Wendepol, so geht die Gerade II in die Gerade III über und die Kurzschlußspannung Δe_w wird bedeutend kleiner.

Wir müssen ferner noch die effektive Reaktanzspannung prüfen:

$$e_s = \frac{\beta}{b_r} \frac{N}{K} l_i\, v\, AS\, \lambda_{Lz} \cdot 10^{-6}.$$

Ankerkonstante:

$$\frac{N}{K} l_i\, v\, AS \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 34{,}7 \cdot 12{,}6 \cdot 318 \cdot 10^{-6} = 0{,}278,$$

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1)\, \lambda_{kz} \frac{l_w}{2\, l_1}.$$

Es ist

$$\lambda_{nz} = 1{,}25 \frac{r_5}{r_3} = 1{,}25 \frac{14}{7{,}5} = 2{,}34$$

Digitized by Google

$$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi (\tau - b_i)}{r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 20{,}2}{0{,}75} = 1{,}77$$

$$\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 2{,}14.$$

Setzen wir für massive Wendepole $k_{wc} = 1{,}2$, so wird:

$$\lambda_{Lz} = 2{,}34 + 1{,}77 + 2{,}14 + (1{,}2 - 1)\, 1{,}77 \cdot \frac{1}{2} = 6{,}43$$

Effektive Reaktanzspannung

$$e_s = \frac{\beta}{b_r} \left(\frac{N}{K} l_i v AS \right) \lambda_{Lz} 10^{-6} = \frac{7{,}65}{25{,}1} \cdot 0{,}278 \cdot 6{,}43 = 0{,}545 \text{ Volt.}$$

Gewichte. Die Eisengewichte sind die gleichen, wie bei der Maschine im Beispiel I. Ferner ist:

Gewicht des Wendepoleisens . .	=	225 kg
Gewicht des Ankerkupfers . .	=	890 „
Gewicht des Nebenschlußkupfers	=	650 „
Gewicht des Hauptschlußkupfers	=	285 „
Gewicht des Wendepolkupfers .	=	240 „

Nehmen wir die Lamellenhöhe des Kommutators gleich 3,5 cm und die totale Länge des Kommutators gleich $L_k + 4$ cm $= 22$ cm, so wird das Gewicht des Kommutatorkupfers $= 215$ kg.

Totales Kupfergewicht $\Sigma(G_k) = 2280$ kg.

Ein Vergleich dieser Maschine mit der Maschine ohne Wendepole des ersten Beispiels zeigt, daß der Kupferaufwand um 330 kg gestiegen ist.

Es ist somit zu untersuchen, ob der Mehrpreis infolge des erhöhten Aufwandes an Kupfer durch die erhöhte Leistung gedeckt wird. In den meisten Fällen wird dies zutreffen. Doch auch dann, wenn die Preise zweier Maschinen, die eine mit, die andere ohne Wendepole, die gleichen sind, ist die Wendepolmaschine vorzuziehen, weil sie ein funkenfreies Arbeiten auch bei stark stoßweiser Belastung sichert. Was die Verluste anbelangt, so zeigt die Rechnung, daß sie im allgemeinen ungefähr denjenigen einer Maschine ohne Wendepole gleich sind, jedoch wird, da ein kleiner Luftraum zulässig ist, allgemein bei Wendepolmaschinen der Erregerverlust und somit der konstante Verlust kleiner sein, so daß dadurch ein besserer Wirkungsgrad bei kleineren Belastungen erzielt wird.

Die Maschine wurde mit 2 Stäben pro Nut und $a = 2$ ausgeführt, könnte jedoch, da keine besonders schwierigen Kommutationsverhältnisse vorliegen, auch mit 4 oder 6 Stäben pro Nut und

Digitized by Google

$a = 3$ ausgeführt werden. Bei der Wahl von $a = 2$, ist es jedoch wegen dem großen Werte von $i_a = 295$ Amp. pro Stab zu empfehlen, nur 2 Stäbe in einer Nut anzuordnen.

76. Berechnung eines Wendepolmotors, 15 PS. 200—1200 Umdr. pro Min.

Es ist ein Nebenschlußmotor für 15 PS Dauerleistung, regulierbar von 200 auf 1200 Touren und für eine Klemmenspannung $P = 220$ Volt zu entwerfen. Die Tourenregulierung soll nur durch Änderung der Erregung erreicht werden.

Der großen Feldschwächung wegen wählen wir einen Motor mit Wendepolen.

Der Motor ist für die Belastung, bei der er am meisten beansprucht ist, zu bemessen, nämlich für 15 PS bei 200 Touren. Wählen wir eine vierpolige Anordnung, so wird die Periodenzahl bei 200 Touren 6,7; man darf somit mit Rücksicht auf die Eisenverluste mit der Ankerinduktion hoch gehen. Es ist jedoch zu untersuchen, ob bei der hohen Tourenzahl die von dem Ankerfelde hervorgerufenen Sättigungen die vom Hauptfeld herrührenden nicht überwiegen. Ist dies der Fall, so sind die Eisenverluste bei der hohen Tourenzahl mit den vom Ankerfeld hervorgerufenen Sättigungen zu berechnen (siehe Seite 246).

Bei der Wahl der Sättigung der Ankerzähne ist folgendes zu berücksichtigen. Ist der Luftraum klein, was bei Wendepolmaschinen zulässig ist (so lange das von den Anker-Amperewindungen erzeugte Querfeld nicht zu stark und die zusätzlichen Eisenverluste in den Zähnen nicht zu groß werden, vergl. auch Abschn. 142, S. 531, Bd. I), so wird bei hohen Sättigungen die Amperewindungszahl für die Zähne leicht größer als die für die Luft. Es bilden somit die Amperewindungen der Zähne einen großen Teil der gesamten Amperewindungen. Will man den Vorteil eines kleinen Luftraumes, nämlich die Verminderung des Gewichtes des Magnetkupfers ausnutzen, so darf man mit der Zahnsättigung nicht zu hoch gehen, und es ist die maximale Zahnsättigung kleiner als etwa 25000 zu halten.

Mit Rücksicht auf die obigen Betrachtungen wählen wir

$$B_l = 8000 \qquad AS = 200 \qquad \alpha_i = 0{,}67$$

und finden

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l AS} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{0{,}67 \cdot 8000 \cdot 200} = 56 \cdot 10^4.$$

Digitized by Google

Nehmen wir den Wirkungsgrad des Motors zu 0,82 an, so nimmt der Motor bei Vollast

$$\frac{PS \cdot 0{,}736}{\eta} = \frac{15 \cdot 0{,}736}{0{,}82} = 13{,}5 \text{ KW}$$

auf und es wird

$$D^2 l_i = 56 \cdot 10^4 \frac{13{,}5}{200} = 37{,}8 \cdot 10^3.$$

Nehmen wir weiter

$$l_i \cong b_i = \alpha_i \tau = \frac{\alpha_i \pi D}{2p},$$

so wird bei einer vierpoligen Anordnung

$$D^2 l_i = D^2 \frac{\alpha_i \pi D}{2p} = D^3 \frac{0{,}67 \cdot \pi}{4} = 0{,}525\, D^3 = 37{,}8 \cdot 10^3$$

woraus

$$D = \sqrt[3]{\frac{37\,800}{0{,}525}} = 41{,}5 \text{ cm}.$$

Wir machen $\boldsymbol{D = 41}$ **cm** und erhalten

$$\boldsymbol{l_i = \frac{D^2 l_i}{D^2} = \frac{37800}{41^2} \simeq 22 \text{ cm}.}$$

Mit drei Luftschlitzen zu 1 cm wird nun

$$\boldsymbol{l_1 = l_i + \frac{1}{3} n_s b_s = 22 + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 1 = 23 \text{ cm}}$$

und

$$\boldsymbol{l = 20 \text{ cm}.}$$

Ferner ist

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 41}{4} = 32{,}2 \text{ cm},$$

$$\boldsymbol{b_i = \alpha_i \tau = 0{,}67 \cdot 32{,}2 = 21{,}5 \text{ cm}},$$

bei 200 Touren $v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 100} = \frac{\pi \cdot 41 \cdot 200}{60 \cdot 100} = 4{,}3$ m/sec,

bei 1200 Touren $v = 6 \cdot 4{,}3 = 25{,}8$ m/sec.

Der dem Motor zugeführte Strom

$$J = \frac{KW \cdot 1000}{P} = \frac{13{,}5 \cdot 1000}{220} = 62 \text{ Amp}.$$

Rechnen wir 2 Amp. Erregerstrom (i_n), so wird der Ankerstrom

$$J_a = J - i_n = 62 - 2 = 60 \text{ Amp}.$$

Digitized by Google

Wir wählen eine Reihenwicklung ($a = 1$)

$$i_a = \frac{J_a}{2 \cdot a} = \frac{60}{2} = 30 \text{ Amp.}$$

und die Stabzahl

$$N = \frac{\pi D A S}{i_a} = \frac{\pi \cdot 41 \cdot 200}{30} \simeq 860.$$

Wir ordnen pro Nut $u_n = 6$ Spulenseiten an und geben einer Spule drei Windungen $\left(\frac{N}{K} = 6\right)$.

Wir erhalten pro Nut 18 Drähte und die Nutenzahl wird:

$$Z = \frac{N}{18} = \frac{860}{18} \simeq 48.$$

Wir wählen $\boldsymbol{Z = 49}$, damit die Schaltungsformel ohne Weglassen von Spulen befriedigt wird. Somit

$$\boldsymbol{N = 49 \cdot 18 = 882},$$

$$\boldsymbol{A S = \frac{i_a N}{\pi D} = \frac{30 \cdot 882}{\pi \cdot 41} = 205.}$$

Anzahl der Spulenseiten

$$s = Z u_n = 49 \cdot 6 = 294.$$

Lamellenzahl:

$$K = \frac{s}{2} = \frac{N}{6} = \frac{882}{6} = 147$$

$$y_k = \frac{K + a}{p} = \frac{147 + 1}{2} = 74$$

$$y_1 = y_n u_n + 1 = 12 \cdot 6 + 1 = 73$$

$$y_2 = 75.$$

Wählen wir $s_a = 2{,}65$ Amp/mm², so ergibt sich der Querschnitt des Ankerdrahtes zu

$$q_a = \frac{i_a}{s_a} = \frac{30}{2{,}65} = 11{,}3 \text{ mm}^2.$$

Diesem Querschnitt entspricht ein Draht mit ϕ 3,8/4,3 mm.

Länge einer halben Ankerwindung:

$$l_a = l_1 + 1{,}4\,\tau + 5 \text{ cm} = 23 + 1{,}4 \cdot 32{,}2 + 5 = 73 \text{ cm}.$$

Widerstand der Ankerwicklung bei 50° C Übertemperatur:

$$R_a = \frac{l_a N}{5700 \cdot (2a)^2 q_a} (1 + 0{,}004\, T_a) = \frac{73 \cdot 882}{5700 \cdot 4 \cdot 11{,}4} \cdot 1{,}2 = 0{,}296\ \Omega.$$

Digitized by Google

Kraftfluß und Induktionen bei Leerlauf.

Kraftfluß bei Leerlauf:

$$\Phi = P \frac{a}{N} \frac{60}{pn} 10^8 = \frac{220 \cdot 1 \cdot 60 \cdot 10^8}{882 \cdot 2 \cdot 200} = 3{,}75 \cdot 10^6.$$

Luftinduktion bei Leerlauf:

$$B_l = \frac{\Phi}{b_i l_i} = \frac{3{,}75 \cdot 10^6}{21{,}5 \cdot 22} = 7920.$$

Wir haben pro Nut 18 Drähte mit ϕ 3,8/4,3 mm; wir ordnen zwei nebeneinander und neun übereinander an. Die Nutabmessungen werden dann:

Nutenbreite $r_3 = 2 \cdot 4{,}3 + 1{,}4 = 10$ mm
Nutenhöhe $h = 9 \cdot 4{,}3 + 7{,}3 = 46$ mm.

	Am Kopf	In der Mitte	Am Fuß
Zahnteilung	26,3	23,35	20,4
Zahnbreite	16,3	13,35	10,4
Ideelle Zahninduktion	15600	19100	24500

Machen wir die Ankerhöhe ausschließlich Nutenhöhe $h = 7{,}4$ cm, so wird die Ankerinduktion

$$B_a = \frac{\Phi}{2 k_2 l h} = \frac{3{,}75 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 20 \cdot 7{,}4} = 14100.$$

Der innere Durchmesser

$$D_i = 41 - 2(4{,}6 + 7{,}4) = \mathbf{17\ cm.}$$

Magnetsystem: Kraftfluß im Magnetkern bei Leerlauf:

$$\Phi_m = \sigma \sigma_a \Phi_a \simeq 1{,}2 \cdot 3{,}75 \cdot 10^6 = 4{,}5 \cdot 10^6.$$

Wenden wir runde Pole aus Stahlguß an und nehmen wir $D_m = \mathbf{18{,}5\ cm,}$ so wird $Q_m = 268$ cm^2 und die Magnetinduktion

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{4{,}5 \cdot 10^6}{268} = 16800.$$

Joch: Das Material sei Stahlguß; bei Annahme eines Jochquerschnittes $Q_j = 175$ cm^2 wird die Jochinduktion

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 \cdot Q_j} = \frac{4{,}5 \cdot 10^6}{2 \cdot 175} = \mathbf{12800.}$$

Erregung bei Leerlauf und 200 Touren. Aus Fig. 373 ergeben sich die folgenden mittleren Kraftlinienwege:

$L_j = 66$ cm; $L_m = 2 \cdot 17 = 34$ cm; $L_a = 20$ cm; $L_l = 2 \cdot 4{,}6 = 9{,}2$ cm.

Digitized by Google

Den Luftraum wählen wir aus mechanischen Gründen gleich 2 mm. Es wird dann $k_1 = 1{,}25$.

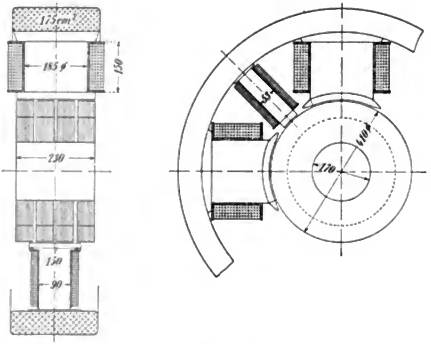


Fig. 373.

Die Amperewindungen bei Leerlauf und 200 Touren sind:

$$AW_l = 1{,}6\, k_1\, \delta\, B_l = 1{,}6 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}2 \cdot 7920 = 3170$$

$$AW_z = L_z\, aw_z = 9{,}2\, \frac{33 + 4 \cdot 140 + 880}{6} = 2260$$

$$AW_a = L_a\, aw_a = 20 \cdot 18 = 360$$

$$AW_m = L_m\, aw_m = 34 \cdot 68 = 2310$$

$$AW_j = L_j\, aw_j = 66 \cdot 17 = 1120$$

Amperewindungen pro Kreis $AW_{ko} = 9220$

und total

$$AW_{to} = p\, AW_{ko} = 18440.$$

Mittlere Windungslänge der Magnetwicklung:

$$l_n \sim \pi\,(19{,}5 + 5{,}5) \sim 80 \text{ cm}.$$

Querschnitt des Erregerdrahtes:

$$q_n = \frac{l_n\, AW_{to}}{5700 \cdot P}\,(1 + 0{,}004\, T_m)(1{,}1 \sim 1{,}2) =$$

$$= \frac{80 \cdot 18440}{5700 \cdot 220} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}17 = 1{,}65 \text{ mm}^2.$$

Diesem Querschnitt entspricht ein Draht mit ϕ 1,45/1,75 mm.

Digitized by Google

Lassen wir eine Stromdichte von 1,6 Amp/mm² zu, so wird der Erregerstrom bei Leerlauf

$$i_{n0} = 1{,}6 \cdot 1{,}65 = 2{,}65 \text{ Amp.}$$

Wir erhalten somit eine totale Windungszahl von

$$w_n = \frac{AW_{t0}}{i_n} = \frac{18440}{2{,}65} \simeq 6800$$

und pro Spule

$$\frac{6800}{4} = 1700 \text{ Windungen.}$$

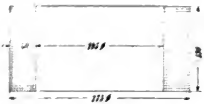


Fig. 374.

Der genaue Wert des Erregerstromes wird

$$i_{n0} = \frac{AW_{t0}}{w_n} = \frac{18440}{6800} = 2{,}71 \text{ Amp.}$$

Die Abmessungen der Spule sind aus Fig. 374 ersichtlich.

Der Widerstand der Nebenschlußwicklung ist

$$R_n = \frac{l_n w_n}{5700 \cdot q_n}(1 + 0{,}004\, T_m) = \frac{\pi \cdot 23{,}5 \cdot 6800}{5700 \cdot 1{,}65} \cdot 1{,}2 = 64\ \Omega.$$

Wattverlust:

$$i_{n0}^2 R_n = 2{,}71^2 \cdot 64 = 470 \text{ Watt.}$$

Abkühlungsfläche einer Spule:

$$\pi \cdot 27{,}5 \cdot 13 + \frac{\pi}{4}(27{,}5^2 - 19{,}5^2) = 1420 \text{ cm},$$

$$T_m = \frac{470}{4 \cdot 1420} 650 \simeq 54^0 \text{ C.}$$

Kommutator. (Material: Hartkupfer).

Lamellenzahl $K = 147$; $\beta \simeq 5{,}5$ mm; Durchmesser:

$$D_k = \frac{K\beta}{\pi} = \frac{147 \cdot 5{,}5}{\pi} \simeq \mathbf{26\ cm.}$$

Es wird genau:

$$\beta = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 26}{147} = \mathbf{5{,}55\ mm.}$$

Umfangsgeschwindigkeit

bei 200 Touren $v_k = \frac{\pi \cdot 26 \cdot 200}{60 \cdot 100} = 2{,}72$ m/sec.

bei 1200 Touren $v_k = 16{,}3$ m/sec.

Digitized by Google

Maximale Potentialdifferenz zwischen zwei benachbarten Lamellen:

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K}\left(\frac{p}{a}\right)_+ = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 220}{147} \cdot \frac{2}{1} = 9{,}4 \text{ Volt.}$$

Bürsten. Wir verwenden Kohlenbürsten und ordnen vier Bürstenstifte an. Die Stromstärke pro Stift ist dann 30 Amp.

Wir geben den Bürsten die Abmessungen

Breite $b_1 = 14$ mm,
Länge $= 18$ mm.

Nehmen wir die Stromdichte unter den Bürsten $s_u \cong 6$ Amp/cm², so wird die Bürstenzahl pro Stift

$$\frac{30}{1{,}4 \cdot 1{,}8 \cdot 6} = 2.$$

Die Länge der zwei Bürsten ist $2 \cdot 1{,}8 = 3{,}6$ cm, weshalb wir die Länge des Kommutators

$$\boldsymbol{L_k = 5 \text{ cm}}$$

wählen.

Die gesamte Auflagefläche aller Bürsten

$$F_b = 2 \cdot 4 \cdot 1{,}4 \cdot 1{,}8 = 20{,}2 \text{ cm}^2.$$

Die Reibungsverluste bei 1200 Touren werden:

$$W_r = 9{,}81 \cdot v_k F_b g \varrho = 9{,}81 \cdot 16{,}3 \cdot 20{,}2 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}25 = 120 \text{ Watt}$$

Der Übergangsverlust:

$$W_u = 1{,}5 \cdot 60 = 90 \text{ Watt}$$

$$W_r + W_u = 210 \text{ Watt}$$

Die spezifische Kühlfläche

$$a_k = \frac{\pi D_k L_k}{W_u + W_r}(1 + 0{,}1\, v_k) = \frac{\pi \cdot 26 \cdot 5}{210} \cdot (1 + 1{,}63) = 5{,}1 \text{ cm}^2/\text{Watt}$$

und die Temperaturerhöhung

$$\boldsymbol{T_k = \frac{C_k}{a_k} = \frac{100}{5{,}1} \cong 20^\circ \text{ C.}}$$

Wendepole. Die Wendepolbreite b_w (Bd. II, S. 281) soll annähernd gleich sein

$$b_w = t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D,$$

worin

$$\varepsilon = + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right).$$

Digitized by Google

Es ist $y_1 = 73$ und somit

$$\varepsilon = +\frac{1}{2}\left(1 + \frac{147}{2} - 73\right) = \frac{3}{4}.$$

Weiter ist $t_1 = 26{,}3$ mm

$$b_D = b\,\frac{D}{D_k} = 14\,\frac{41}{26} = 22 \text{ mm}$$

$$\beta_D = \beta\,\frac{D}{D_k} = 5{,}55\,\frac{41}{26} = 8{,}75 \text{ mm}$$

und somit

$$t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \varepsilon\right)\beta_D = 26{,}3 + 22 - \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{4}\right)8{,}75 =$$
$$= 26{,}3 + 22 + 2{,}2 = 50{,}5 \text{ mm}.$$

Da es von Vorteil ist, die Wendepolbreite gleich einem ganzen Vielfachen der Nutenteilung zu machen, so nehmen wir

$$\boldsymbol{b_{we} \simeq 2\,t_1 = 2 \cdot 26{,}3 \simeq 53 \text{ mm}.}$$

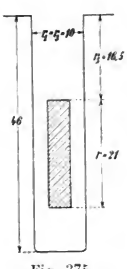


Fig. 375.

Machen wir $\delta_{we} = \delta = 2$ mm, so wird die ideelle Wendepolbreite

$$\boldsymbol{b_{wei} = b_{we} + 4{,}5\,\delta_w = 5{,}3 + 4{,}5 \cdot 0{,}2 = 6{,}2 \text{ cm}}.$$

Ist die Länge des Wendepols gleich der Ankerlänge, so wird die erforderliche Induktion unter dem Wendepol $B_{wi} = 920$. Es ist jedoch wegen der Stabilität des Feldes zu empfehlen, den Wert von B_{wi} höher zu nehmen. Wir nehmen deshalb l_{we} kleiner als die Ankerlänge, und zwar $\boldsymbol{l_{we} = 15 \text{ cm}}$. Es wird dann:

$$\boldsymbol{l_{wei} = l_{we} + 3 \cdot \delta = 15 + 3 \cdot 0{,}2 = 15{,}6 \text{ cm}}.$$

Die Leitfähigkeiten (siehe Fig. 375):

$$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3}\right) = 1{,}25\left(\frac{21}{3 \cdot 10} + \frac{16{,}5}{10}\right) = 2{,}94$$

$$\lambda_{ks} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi\,t_1}{2\,r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 26{,}3}{2 \cdot 10} = 0{,}56$$

$$\lambda_s \simeq 0{,}8, \quad l_s = 50 \text{ cm}, \quad 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 0{,}9.$$

$$\boldsymbol{\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 2{,}94 + 0{,}56 + 0{,}9 = 4{,}4}.$$

Für $\sigma_i = 0{,}67$ und ungesättigte Polspitzen ergibt sich λ_{q0} aus Fig. 343, Seite 291, zu 3,2.

Digitized by Google

Feldstärke im Luftspalt des Wendepols für geradlinige Kommutation:

$$B_{wl} = \frac{2 t_1 A S \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\beta_D} \frac{l_1}{l_w} + 2 A S \lambda_{q\,0} \frac{l_1 - l_w}{l_w} =$$

$$= \frac{2 \cdot 26{,}3 \cdot 205 \cdot 4{,}4}{50{,}5} \frac{23}{15} + 2 \cdot 205 \cdot 3{,}2 \frac{8}{15} = 2170.$$

$$\Phi_{wa} = B_{wl}\, l_{wi}\, b_{wi} = 2170 \cdot 15{,}6 \cdot 6{,}2 = 0{,}21 \cdot 10^6.$$

Mittlere Zahninduktion unter dem Wendepol:

$$B_{wz} = 19100 \frac{2170}{7920} = 5250.$$

Kraftfluß in den Wendepolschenkeln:

$$\Phi_{wm} = \sigma_k\, \Phi_{wa} = 1{,}6 \cdot 0{,}21 \cdot 10^6 = 0{,}34 \cdot 10^6.$$

Entsprechend Fig. 373 ist $Q_{wm} = 47{,}5\ \text{cm}^2$ und die Induktion im Magnetschenkel

$$B_{wm} = \frac{\Phi_{wm}}{Q_{wm}} = \frac{0{,}34 \cdot 10^6}{47{,}5} = 7150.$$

Als Material der Pole wählen wir Schmiedeeisen.

Zur Bestimmung der Sättigung im Anker- und Jocheisen bei erregten Wendepolen müssen wir erst die Sättigung dieser Teile bei Vollast kennen.

Der Widerstand der Ankerwicklung wurde warm gleich $R_a = 0{,}296\,\Omega$ gefunden. Nehmen wir den Widerstand der Wendepolwicklung gleich $0{,}1\,\Omega$ an, so ist der Ohm'sche Spannungsabfall in der Anker- und Wendepolwicklung gleich

$$J_a (R_a + R_c) = 60\,(0{,}296 + 0{,}1) = 23{,}8 \text{ Volt}.$$

Rechnen wir für den Spannungsabfall unter den Bürsten $2\,\Delta P = 2{,}2$ Volt, so wird die induzierte EMK bei Vollast

$$E_a = 220 - (23{,}8 + 2{,}2) = 194 \text{ Volt}.$$

Bei Belastung und 200 Umdr. pro Min. wird der in den Anker eintretende Kraftfluß

$$\Phi_a = 3{,}75 \cdot 10^6 \frac{194}{220} = 3{,}32 \cdot 10^6$$

und der Kraftfluß der Hauptpole

$$\Phi_m = 4{,}5 \cdot 10^6 \frac{194}{220} = 4{,}0 \cdot 10^6.$$

Somit:

$$\Phi_a' = \frac{1}{2}(\Phi_a + \Phi_{wa}) = \frac{1}{2}(3{,}32 + 0{,}21)\, 10^6 = 1{,}765 \cdot 10^6$$

Digitized by Google

$$\Phi_a'' = \frac{1}{2}(\Phi_a - \Phi_{wa}) = \frac{1}{2}(3{,}32 - 0{,}21)\,10^6 = 1{,}555 \cdot 10^6$$

$$\Phi_j' = \frac{1}{2}(\Phi_m + \Phi_{wm}) = \frac{1}{2}(4{,}0 + 0{,}34)\,10^6 = 2{,}17 \cdot 10^6$$

$$\Phi_j'' = \frac{1}{2}(\Phi_m - \Phi_{wm}) = \frac{1}{2}(4{,}0 + 0{,}34)\,10^6 = 1{,}83 \cdot 10^6$$

$$B_a' = 13200 \qquad B_j' = 12400$$

$$B_a'' = 11700 \qquad B_j'' = 10400$$

Bei Vollast und 1200 Umdr. pro Min. wird:

$$\Phi_a = 0{,}555 \cdot 10^6; \qquad \Phi_m = 0{,}666 \cdot 10^6$$

$$B_a' = 2860 \qquad B_j' = 2880$$

$$B_a'' = 1290 \qquad B_j'' = 920$$

Wendepolwicklung. Erforderliche Amperewindungen eines Wendepolpaares

$$AW_w = \tau AS + AW_N,$$

worin:

$$AW_N = AW_{wl} + AW_{wm} + AW_{wz} + AW_a' + AW_j' - AW_a'' - AW_j''.$$

Aus Fig. 373 ist zu entnehmen:

$$L_{wm} = 38\text{ cm}; \quad \frac{1}{2}L_{wa} = 12{,}5\text{ cm}; \quad \frac{1}{2}L_{wj} = 35\text{ cm}.$$

Die Amperewindungen pro Wendepolkreis für Anker und Jochsättigungen bei 200 Umdr. pro Min. werden nun:

$$AW_l = 1{,}6\,k_1\,\delta_w\,B_{wl} = 1{,}6 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}2 \cdot 2170 = 870$$

$$AW_{wm} = aw_m\,L_{wm} = 1{,}4 \cdot 38 = 55$$

$$AW_{wz} = aw_z\,L_z = 0{,}8 \cdot 9{,}2 \simeq 10$$

$$AW_{wa}' = aw_a' \cdot \frac{1}{2}L_a = 12 \cdot 12{,}5 = 150$$

$$AW_{wj}' = aw_j' \cdot \frac{1}{2}L_j = 15 \cdot 35 = 525$$

$$1610$$

$$AW_a'' = aw_a'' \cdot \frac{1}{2}L_a = 7 \cdot 12{,}5 \simeq 85$$

$$AW_j'' = aw_j'' \cdot \frac{1}{2}L_j = 8{,}5 \cdot 35 = 300$$

$$385 \qquad 385$$

$$AW_N = 1225$$

$$\tau AS = 32{,}2 \cdot 205 = 6600$$

$$7825$$

Digitized by Google

Berechnet man in gleicher Weise AW_w für die Joch- und Ankersättigungen bei 1200 Umdr. pro Min., so erhält man $AW_w = 7560$. Wir wollen deshalb mit einer Amperewindungszahl $AW_w = 7680$ rechnen. Bei 1200 Touren, wo die Kommutation sich am ungünstigsten gestaltet, haben wir dann eine Überkommutation, während wir bei kleinerer Tourenzahl eine Unterkommutation haben.

Die Amperewindungen für alle Wendepole sind gleich:

$$2 \cdot 7680 = 15360.$$

Es ist $J_a = 60$ Amp., die gesamte erforderliche Windungszahl

$$w_c = \frac{15360}{60} = 256.$$

Pro Wendepol erhalten wir 64 Windungen in Serie. Nehmen wir 2 Drähte mit ϕ 4,5/5,0 mm parallel, so ist der gesamte Querschnitt der Wendepolwicklung $q_c = 2 \cdot 16 = 32$ mm² und die Stromdichte $s_c = 1{,}87$ Amp/mm².

Mittlere Windungslänge der Wendepolwicklung $l_c = 35$ cm.

Widerstand der Wendepolwicklung warm:

$$R_c = \frac{l_c w_c}{5700 \cdot q_c} (1 + 0{,}004 T_c) = \frac{35 \cdot 256}{5700 \cdot 32} 1{,}2 = 0{,}06\ \Omega.$$

Wattverlust in der Wendepolwicklung:

$$J_a^2 R_c = 60^2 \cdot 0{,}055 = 215 \text{ Watt}.$$

Abkühlungsfläche einer Spule = 710 cm².

Temperaturerhöhung:

$$T_c = \frac{215}{4 \cdot 710} \cdot 650 = 49^0 \text{ C}.$$

Kraftfluß und Induktionen im Anker bei Vollast und 200 Touren. Der Widerstand der Wendepolwicklung ist jetzt genau bekannt. Der Ohm'sche Spannungsabfall:

$$J_a (R_a + R_c) = 60\,(0{,}296 + 0{,}06) = 21{,}4 \text{ Volt}$$

Spannungsabfall unter den Bürsten = 2,1 „

23,5 Volt

Induzierte EMK bei Vollast:

$$E_a = 220 - 23{,}5 = 196{,}5 \text{ Volt}.$$

Kraftfluß bei Belastung:

$$\Phi_b = \frac{E_a \cdot 60 \cdot 10^8}{N n} \frac{a}{p} = \frac{196{,}5 \cdot 60 \cdot 10^8}{882 \cdot 200} \frac{1}{2} = 3{,}33 \cdot 10^6.$$

Digitized by Google

Es ergeben sich folgende Induktionen:

$$B_l = 7040$$

$$B_{z\,min} = 14000, \qquad B_{z\,mitt} = 17000, \qquad B_{z\,max} = 21500$$

$$B_a' = 13700 \qquad B_a'' = 11300.$$

Verluste und Wirkungsgrad bei Vollast und 200 Touren.

Eisenverluste. Die Eisenverluste mit der Sättigung $B_a' = 13700$ und $\sigma_h = 1{,}5$ und $\sigma_w = 10$ gerechnet, ergeben sich zu:

	$W_e =$	175 Watt
Stromwärmeverlust in der Ankerwicklung	$W_{ka} =$	1065 „
Kommutatorverluste	$W_u + W_r =$	110 „
Stromwärmeverlust in der Wendepolwicklung	$W_c' =$	215 „
Erregerverlust	$W_n =$	460 „
Totale Verluste		2025 Watt

Wirkungsgrad ausschließlich Luft- und Lagerreibung . . . . . $\eta =$ 84,4 %

Eisenverluste bei Vollast und 1200 Touren. Induzierte EMK $E_a = 195{,}5$ Volt; Kraftfluß $\Phi_b = 0{,}555 \cdot 10^6$; Luftinduktion $B_l = 1170$; Amperewindungen für die Luft $AW_l = 470$.

Von den Ankeramperewindungen erzeugter Kraftfluß (siehe Seite 246):

$$\Phi_A = \frac{1{,}3\, b_i\, AS}{2 \cdot AW_l}\, \Phi = \frac{1{,}3 \cdot 21{,}5 \cdot 205}{2 \cdot 470} \cdot 0{,}555 \cdot 10^6 = 3{,}38 \cdot 10^6.$$

Der Kraftfluß Φ_A ist größer als der Hauptkraftfluß Φ, wir müssen somit die Verluste mit der von Φ_A hervorgerufenen Sättigung rechnen.

$$B_{aA} = \frac{\Phi_a}{2 k_2 \cdot l \cdot h} = \frac{3{,}38 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 7{,}4 \cdot 20} = 12700.$$

Zur Berechnung der Zahnverluste bei Belastung entnimmt man der Übertrittcharakteristik den Wert der maximalen Luftinduktion unter dem Pol $B_{l\,max}$. Hieraus ermittelt man dann die maximale Induktion im Zahnkopf $(B_{z\,min})_{max}$ und legt dieser die Berechnung der Zahnverluste zu Grunde. Man findet aus der Übertrittscharakteristik (Kurve *I*, Fig. 377) $B_{l\,max} = 7600$, woraus sich $(B_{z\,min})_{max}$ zu 15000 ergibt.

Die Periodenzahl $c_1 = \frac{pn}{60} = 40$.

Es ergeben sich hieraus die Eisenverluste zu: $W_e = 2025$ Watt.

Abkühlung des Ankers (siehe Seite 744, Bd. I). Es ergibt sich bei Vollast und 200 Touren

$a_a = 10$ cm²/Watt, $\quad a_{st} = 8{,}1$ cm²/Watt, $\quad a_e = 58$ cm²/Watt,

Digitized by Google

und bei Vollast und 1200 Touren

$a_a = 7{,}6$ cm²/Watt, $a_{sl} = 20{,}2$ cm²/Watt, $a_e = 10{,}8$ cm²/Watt.

Nachprüfung der Maschine auf Kommutierung (siehe Seite 292). Als Kriterium ist hier der Wert e_s zu berechnen:

$$e_s = \frac{\beta}{b_r} \frac{N}{K} l_i v A S \lambda_{Lz} \cdot 10^{-6} \text{ Volt.}$$

Es ist:

$$b_r = b_1 + \beta \left[1 - (1 + p_w) \frac{a}{p} \right] = 14 + 5{,}55 \cdot \frac{1}{2} = 16{,}78.$$

Weiter ist:

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} + (k_w - 1) \lambda_{kz} \frac{l_w}{l_1}.$$

Es ist

$$\lambda_{nz} = 1{,}25 \frac{r_5}{r_3} = 1{,}25 \frac{16{,}5}{10} = 2{,}06$$

$$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi (\tau - b_i)}{r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 10{,}7}{1} = 1{,}4$$

$$\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 0{,}8 \frac{50}{22} = 1{,}8.$$

Nehmen wir für massive Wendepole $k_w = 1{,}2$, so wird

$$\lambda_{Lz} = 2{,}06 + 1{,}4 + 1{,}8 + (1{,}2 - 1)\, 1{,}4 \frac{15}{23} = 5{,}44.$$

Ankerkonstante bei 1200 Touren:

$$\frac{N}{K} l_i v A S \cdot 10^{-6} = 6 \cdot 22 \cdot 25{,}8 \cdot 20{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}7.$$

Effektive Reaktanzspannung:

$$e_s = \frac{5{,}55}{16{,}78} \cdot 0{,}7 \cdot 5{,}44 = 1{,}26 \text{ Volt},$$

welcher Wert zulässig ist.

Da die Sättigungen des Wendepolkreises bei 1200 Touren sehr gering sind, so wird die Magnetisierungskurve für diese Tourenzahl, bei welcher sich die Kommutation am ungünstigsten gestaltet, nahezu geradlinig verlaufen und eine Kontrolle der von dem fehlerhaften Felde induzierten EMK ist überflüssig.

Gewichte. Ankerkupfer 65 kg, Magnetkupfer 75 kg, Wendepolkupfer 26 kg, Ankereisen 155 kg, Pole und Polschuhe 285 kg, Joch 370 kg.

Digitized by Google

Berechnung der Abhängigkeit der Tourenzahl vom Erregerstrome. In Fig. 376 Kurve *I* ist die Leerlaufcharakteristik des Motors bei 200 Touren aufgezeichnet, und zwar wurde sie gerechnet mit denjenigen Sättigungen im Joch und Anker, welche bei vollerregten Wendepolen auftreten. Dies wurde gemacht, um später hieraus die richtige Belastungscharakteristik zu ermitteln.

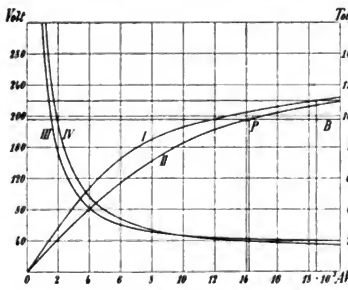


Fig. 376.

Die Leerlaufcharakteristiken bei voll- und unerregten Wendepolen weichen jedoch so wenig von einander ab, daß man sich für die Berechnung der Tourenzahl bei Leerlauf der Kurve *I* Fig. 376 bedienen kann.

Bei einer bestimmten Erregung sei die bei 200 Touren induzierte EMK gleich E_1. Diese ist der Leerlaufcharakteristik zu entnehmen. Da jedoch bei Leerlauf die induzierte EMK E_a gleich der Klemmenspannung, d. h. $E_a = 220$ Volt ist, so muß die Tourenzahl bei dieser Erregung

$$n_1 = \frac{E_a}{E_1} \cdot 200 = \frac{220}{E_1} \cdot 200$$

sein. Nach dieser Gleichung ist für jede Erregung die Tourenzahl bei Leerlauf leicht zu rechnen. Die erhaltenen Werte sind in Kurve *III* aufgetragen.

Um die Tourenzahl bei Belastung und einer bestimmten Erregung zu finden, müssen wir erst die Größe der Ankerrückwirkung festlegen. Da die Bürsten in der neutralen Zone stehen, so ist $AW_e = 0$ und wir haben nur eine Entmagnetisierung durch das Ankerquerfeld (AW_q). Diese können wir nach der auf S. 314, Bd. I beschriebenen Methode aus der Übertrittscharakteristik finden. Aus den dortigen Betrachtungen läßt sich eine Methode ableiten, die gestattet, die entmagnetisierende AW-Zahl AW_q für jedes Feld (jede Tourenzahl) ohne Probieren zu finden.

In Fig. 377 ist Kurve *I* die Übertrittcharakteristik. Wir bilden jetzt von dieser Kurve die Integralkurve (Kurve *II*) und wählen den Polabstand für die Konstruktion dieser Kurve (siehe S. 776, Bd. I) gleich $2 h_i AS$. Es ist jetzt z. B. der Inhalt des

Digitized by Google

Teiles $OAaO$ der Kurve I gleich $2b_i AS \cdot \overline{a\alpha}$. Nehmen wir $\overline{ab} = 2b_i AS$, so ist der Inhalt des Kurventeiles $bBAab$ gleich $2b_i AS(\overline{a\alpha} - \overline{b\beta})$. Tragen wir $\overline{a\alpha} - \overline{b\beta} = \overline{ce}$ auf die Ordinate cd, die in der Mitte zwischen den Geraden Bb und Aa ($\overline{bc} = \overline{ac}$) liegt, auf, so ist der Inhalt des Kurventeiles $bBAab$ gleich $2b_i AS \cdot ce$ und da $\overline{ab} = 2b_i AS$, auch gleich dem Rechteck $bGFab$. Es müssen somit die schraffierten Flächen $GHBG$ und $HAFH$ gleichen Inhalt haben. Ist die

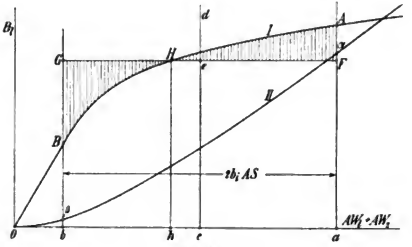


Fig. 377.

Luftinduktion somit $\overline{Hh}$, so sind die rückwirkenden Amperewindungen $AW_q = \overline{hc}$, wie ein Vergleich der Fig. 279, Bd. I, und Fig. 377 zeigt. Die entmagnetisierenden Amperewindungen AW_q sind für jede Luftinduktion bekannt, wenn wir die zu der Luftinduktion gehörige Lage von dem Punkt e kennen. Die verschiedenen Lagen des Punktes e werden eine Kurve bilden, welche leicht in folgender Weise zu ermitteln ist.

Kurve I (Fig. 378) stellt die Übertrittcharakteristik dar. Es wurde hier der Ordinatenmaßstab so gewählt, daß diese direkt die induzierte EMK bei einer Tourenzahl von 200 angeben, während die Abszissen die Amperewindungszahl für alle Pole $p(AW_l + AW_r)$ darstellen. Wir verschieben jetzt die Integralkurve II (welche mit dem Polabstand $2pb_i AS$ konstruiert wurde) einmal um $pb_i AS$ nach rechts (Kurve III) und einmal um $pb_i AS$ nach links (Kurve IV). Die Ordinatendifferenzen dieser Kurven geben uns die gesuchte Kurve der Punkte e (Kurve V). Aus dieser Kurve sind somit für jede bei 200 Touren induzierte EMK die totalen entmagnetisierenden Amperewindungen pAW_q als Abszissendifferenz zwischen den Kurven I und V abzugreifen.

Wir können somit jetzt aus der Leerlaufcharakteristik (Kurve I, Fig. 376) die Kurve der induzierten EMK bei Vollast konstruieren,

Digitized by Google

indem wir die Abszissen der Kurve *I* um pAW_q vergrößern. Wir erhalten dann die Kurve *II* (Fig. 376).

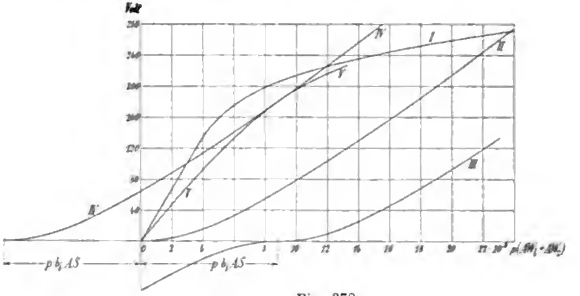


Fig. 378.

Die induzierte EMK bei Vollast ist nach S. 367 196,5 Volt (Gerade *AB*). Der Schnittpunkt *P* der Gerade *AB* mit der Kurve *II* gibt uns die Erregung bei 200 Touren und Vollast. Entnimmt man die EMK aus der Kurve *II* bei irgend einer Erregung E_1, so finden wir die Tourenzahl des Motors bei Belastung bei dieser Erregung gleich

$$n_1 = \frac{E_a}{E_1} \cdot 200 = \frac{196{,}5 \cdot 200}{E_1}.$$

Hieraus ergibt sich die Kurve *IV* (Fig. 376), welche die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Erregung darstellt. Aus dem Vergleich der Kurven *III* und *IV* ergibt sich, daß bei niedriger Tourenzahl die Tourenzahl bei Leerlauf größer ist als bei Belastung, während bei den höheren Tourenzahlen die Verhältnisse umgekehrt liegen.

77. Berechnung eines Hauptstromgenerators, 600 KW, 300 Umdr. pro Min.

Für eine Hauptstrom-Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und veränderlichem Strom ist ein 600 KW-Generator zu entwerfen. Die Klemmenspannung soll bei Vollast gleich 2500 Volt sein. Die Tourenzahl ist 300.

Wir nehmen an:

$$\alpha_i = 0{,}7; \quad B_i = 8500; \quad AS = 230$$

Digitized by Google

und erhalten

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{a_i B_l A S} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{0{,}7 \cdot 8500 \cdot 230} = 44 \cdot 10^4$$

und

$$D^2 l_i = 44 \cdot 10^4 \frac{KW}{n} = 44 \cdot 10^4 \frac{600}{300} = 88 \cdot 10^4.$$

Bei der Trennung von $D^2 l_i$ in D und l_i geht man hier am besten vom Durchmesser aus, indem man diesen aus AS und der erforderlichen Lamellenzahl berechnet.

Bei Vollast (600 KW) ist die Klemmenspannung $P = 2500$ Volt und somit die Stromstärke $J_a = \frac{600000}{2500} = 240$ Amp. Wir nehmen deshalb eine Reihenwicklung $a = 1$ und wählen die Polzahl gleich 8.

Maximale Potentialdifferenz benachbarter Lamellen:

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K} \left(\frac{p}{a}\right)_+.$$

Nehmen wir $P_{dk} = 33$ Volt an, so wird

$$K = \frac{\pi a P}{P_{dk}} \left(\frac{p}{a}\right)_+ = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 2500}{33} \cdot 4 = 952.$$

Damit P_{dk} 33 Volt nicht übersteige, soll somit $K \geq 952$ sein.

Es ist jetzt der Durchmesser

$$D = \frac{i_a N}{\pi A S}$$

festgelegt. Man erhält hier einen passenden Durchmesser, wenn man $N = K$ setzt, d. h. wenn man die Lamellenzahl verdoppelt, es wird dann

$$D = \frac{i_a N}{\pi A S} = \frac{120 \cdot 952}{\pi \cdot 230} = 158.$$

Wir nehmen $\boldsymbol{D = 160}$ **cm,** es wird dann

$$v = 25{,}2 \text{ m/sec} \qquad l_i = \frac{D^2 l_i}{D^2} = \frac{88 \cdot 10^4}{160^2} = 34{,}3 \text{ cm}.$$

Für $l_1 = 36$ und 4 Luftschlitze zu 1 cm wird $l = 36 - 4 \cdot 1 =$ **32** cm und

$$\boldsymbol{l_i = l_1 - \frac{1}{3} n_s b_s = 36 - \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 1 \sim 34{,}7 \text{ cm}.}$$

Um eine gute Ausnützung der Nute zu erhalten und den Aufwand an Isolation einzuschränken, ordnen wir $u_n = 6$ Stäbe pro Nut an. Mit Rücksicht darauf, daß alle Nuten voll und die Wick-

Digitized by Google

lungsformeln befriedigt werden, wählen wir endgültig die Stabzahl $N = 966$, die verdoppelte Lamellenzahl $K_1 = 966$, die ursprüngliche Lamellenzahl $K = 483$ und die Nutenzahl $Z = 161$.

Kommutatorschritt:

$$y_k = \frac{K \pm a}{p} = \frac{483 + 1}{4} = 121.$$

Teilschritte:

$$y_1 = 121 \quad \text{und} \quad y_2 = 121.$$

Da $y_1 = u_n y_n + 1 = 6 \cdot 20 + 1 = 121$, können die oberen und die unteren Stäbe einer Nut für sich gemeinsam isoliert werden. Genauer Wert von AS:

$$AS = \frac{i_a N}{\pi D} = \frac{120 \cdot 966}{\pi \cdot 160} = 230.$$

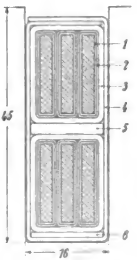
Länge einer Ankerwindung:

$$l_a \simeq l_1 + 1{,}4\,\tau + 6\text{ cm} = 36 + 1{,}4 \cdot 62{,}8 + 6 = 130\text{ cm}.$$

Nehmen wir die Stababmessungen gleich $2{,}4 \times 15$, so wird $q_a = 36$ mm und $s_a = \frac{i_a}{q_a} = \frac{120}{36} = 3{,}34$ Amp/mm².

Ankerwiderstand waren:

$$R_a = \frac{l_a N}{(2a)^2 \cdot 5700 \cdot q_a} \cdot (1 + 0{,}004\,T_a) = \frac{130 \cdot 966}{4 \cdot 5700 \cdot 36} \cdot 1{,}2 = 0{,}183\ \Omega.$$



Es liegen pro Nut 3 Stäbe nebeneinander und 2 übereinander. Die Anordnung der Isolation ist aus Fig. 379 zu ersehen. Die Nutenabmessungen ergeben sich zu 16×45.

Fig. 379.

1. 0,4 mm Baumwollband.
2. 0,4 mm Ölleinwand.
3. 1 mm Mikanitleinwand.
4. 0,75 mm Mikanitleinwand.
5. 2 mm Mikanit.
6. 1 mm Mikanit.

Kraftfluß und Induktionen bei Vollast. Nehmen wir $2{,}5\,\%$ Spannungsabfall an, so wird die induzierte EMK

$$E_a = P \cdot 1{,}025 = 2500 \cdot 1{,}025 = 2562{,}5\text{ Volt}.$$

Der Kraftfluß:

$$\Phi_b = E_a \frac{a}{N} \frac{60}{p\,n} \cdot 10^8 = \frac{2562{,}5 \cdot 1 \cdot 60}{966 \cdot 4 \cdot 300} 10^8 = 13{,}25 \cdot 10^6.$$

Digitized by Google

Die Luftinduktion:

$$B_i = \frac{\Phi_b}{b_i l_i} = \frac{13{,}25 \cdot 10^6}{44 \cdot 34{,}7} = 8680.$$

Für die ideellen Zahninduktionen kann man folgende Tabelle aufstellen:

	Am Kopf	In der Mitte	Am Fuß
Zahnteilung	31,2	30,3	29,4
Zahnbreite	15,2	14,3	13,4
Ideelle Zahninduktion . . .	21450	22800	24350

Nehmen wir die Ankerhöhe ausschließlich Nutenhöhe gleich 18 cm, so wird die Ankerinduktion

$$B_a = \frac{\Phi_b}{2 \cdot k_2 \, l \, h} = \frac{13{,}25 \cdot 10^6}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 32 \cdot 18} = 12850$$

und

$$D_i = 160 - 2\,(18 + 4{,}5) = \mathbf{115\ cm.}$$

Kraftfluß im Magnetkern:

$$\Phi_m = \sigma\, \Phi_b = 1{,}15 \cdot 13{,}25 \cdot 10^6 = 15{,}25 \cdot 10^6.$$

Für einen Durchmesser des Polkernes $D_m = 35{,}5$ cm und somit $Q_m = 990$ cm² und einen Jochquerschnitt $Q_j = 550$ cm² wird die Magnet- und Jochinduktion bezw.:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m} = \frac{15{,}25 \cdot 10^6}{990} = 15400$$

und

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2 \cdot Q_j} = \frac{15{,}25 \cdot 10^6}{2 \cdot 550} = 13850.$$

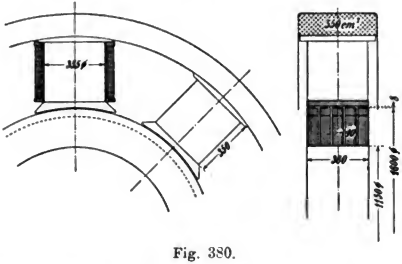


Fig. 380.

Erregerwicklung. In Fig. 380 ist die Maschine mit den oben ermittelten Abmessungen aufgezeichnet. Die Polhöhe wurde gleich

Digitized by Google

35 cm angenommen. Es ergeben sich nach dieser Figur folgende Kraftlinienlängen:

$L_a = 53$ cm; $L_z = 2 \cdot 4{,}5 = 9$ cm; $L_m = 2 \cdot 39 = 78$ cm; $L_j = 102$ cm

Ferner wählen wir $\delta = 0{,}6$ cm; es wird dann $k_1 = 1{,}25$.

Wir erhalten folgende Amperewindungen pro Kreis:

$$AW_l = 1{,}6\, k_1\, \delta\, B_l = 1{,}6 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}6 \cdot 8680 = 10400$$
$$AW_z = L_z a w_z = 9\, \frac{400 + 4 \cdot 600 + 800}{6} = 5400$$
$$15800$$
$$AW_a = 53 \cdot 11 = 585$$
$$AW_m = 78 \cdot 39 = 3040$$
$$AW_j = 102 \cdot 23 = 2350$$
$$= 21775$$
$$AW_r \simeq \frac{1}{2}(\tau_i - b) AS = \frac{1}{2} \cdot 18{,}8 \cdot 230 = 2160$$

Amperewindungen pro Kreis $AW_k = 23935$

$$\frac{AW_l + AW_z}{b_i \cdot AS} = \frac{15800}{10100} = 1{,}56.$$

Totale Amperewindungszahl:

$$AW_t = p\, AW_k = 4 \cdot 23935 \simeq 96000.$$

Windungszahl der Magnete:

$$w_h = \frac{AW_t}{J_a} = \frac{96000}{240} = 400.$$

Wir nehmen vier Drähte Vierkant-Kupfer $6{,}8 \times 6{,}8/7{,}6 \times 7{,}6$ parallel ($q_h = 185$ mm²) und erhalten somit pro Spule 200 einfache Windungen. Die Stromdichte der Erregerwicklung wird $s_h = 1{,}3$ Amp/mm².

Mittlere Länge einer Windung:

$$l_h = \pi (38{,}5 + 3{,}9) = 133 \text{ cm}.$$

Widerstand der Erregerwicklung warm:

$$R_h = \frac{l_h w_h}{5700 \cdot q_h} (1 + 0{,}004\, T_m) = \frac{133 \cdot 400}{5700 \cdot 185} (1 + 0{,}2) = 0{,}0605\ \Omega.$$

Der Wattverlust in der Erregerwicklung wird:

$$W_H = J_a^2 R_h = 240^2 \cdot 0{,}0605 = 3500 \text{ Watt}.$$

Die Abkühlungsfläche einer Spule

$$[\pi (38{,}5 + 7{,}8)]\, 31 + 133 \cdot 3{,}9 = 5030$$

und die Temperaturerhöhung der Erregerwicklung

$$T_m \simeq \frac{3500}{8 \cdot 5030} \cdot 550 \simeq 47{,}5^0 \text{ C}.$$

Digitized by Google

Der Spannungsabfall in der Anker- und Erregerwicklung ergibt sich zu:

$$J_a(R_a + R_h) = 240\,(0{,}183 + 0{,}0605) = 58{,}5 \text{ Volt.}$$

Rechnen wir 2 Volt Spannungsverlust unter den Bürsten, so wird der Spannungsabfall 60,5 Volt und weicht nur unwesentlich von dem angenommenen Spannungsabfall 62,5 Volt ab.

Kommutator: Wir haben oben die Lamellenzahl $K_1 = 966$ gefunden. Wählen wir den Kommutatordurchmesser $D_k = \mathbf{130\ cm}$, so wird die Umfangsgeschwindigkeit

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60 \cdot 100} = \frac{\pi \cdot 130 \cdot 300}{60 \cdot 100} = \mathbf{20{,}4\ m/sec.}$$

und die Lamellenteilung

$$\beta = \frac{\pi D_k}{K_1} = \frac{\pi \cdot 130}{966} = \mathbf{0{,}422\ cm,}$$

welche Werte zulässig sind.

Der genaue Wert der maximalen Potentialdifferenz benachbarter Lamellen

$$P_{dk} = \frac{\pi a P}{K_1}\left(\frac{p}{a}\right)_+ = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 2500}{966} \cdot \frac{4}{1} = \mathbf{32{,}5\ Volt.}$$

Bürsten: Wir ordnen $2p = 8$ Stifte an. Die Stromstärke pro Stift wird dann $\frac{240}{4} = 60$ Amp. Wenden wir Bürsten $\mathbf{10 \times 18\ mm}$ an und lassen wir eine Stromdichte von 5,5 Amp/mm² zu, so wird die Anzahl der Bürsten pro Stift:

$$\frac{60}{1 \cdot 1{,}8 \cdot 5{,}5} \simeq 6.$$

Die nutzbare Länge des Kommutators L_k wählen wir dementsprechend gleich $6 \cdot 1{,}8 + 3{,}2 = 14$ cm.

Die gesamte Bürstenfläche:

$$F_b = 8 \cdot 6 \cdot 1{,}8 = 86{,}4 \text{ cm}^2.$$

Kommutatorverluste: Reibungsverluste:

$$W_r = 9{,}81 \cdot F_b\, v_k\, g\, \varrho = 9{,}81 \cdot 20{,}4 \cdot 86{,}4 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}25 = 645 \text{ Watt.}$$

Nehmen wir für harte Kohlen $2 \cdot A P f_u = 2$ Volt, so werden die Übergangsverluste:

$$W_u = 2 \cdot A P f_u J_a = 2 \cdot 240 = 480 \text{ Watt.}$$

Digitized by Google

Die gesamten Kommutatorverluste betragen somit 1125 Watt und die spezifische Abkühlungsfläche

$$a_k = \frac{\pi D_k L_k}{W_a + W_r}(1 + 0{,}1\, v_k) = \frac{\pi \cdot 130 \cdot 14}{1125}(1 + 2{,}04) = 15{,}4 \text{ cm}^2/\text{Watt},$$

so daß die Temperaturerhöhung des Kommutators klein bleibt.

Charakteristische Kurven: In Fig. 381 stellt Kurve *I* die Übertrittcharakteristik und Kurve *II* die Leerlaufscharak-

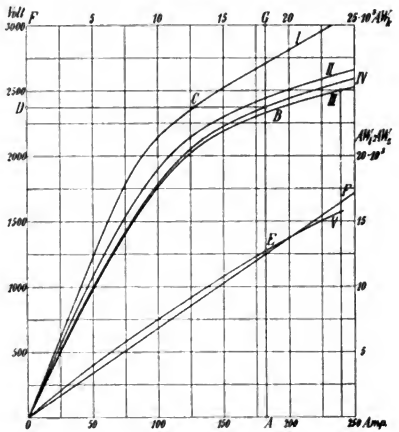


Fig. 381.

teristik dar. Aus letzterer Kurve wurden die Kurven *III* und *IV*: die Belastungscharakteristik und die Kurve der induzierten EMKe ermittelt (siehe für die Konstruktion S. 601, Bd. I). Es wurde hierbei der Spannungsabfall bei 240 Amp. gleich 60,5 Volt gesetzt und angenommen, daß er sich proportional dem Strome ändere. Die rückwirkenden Amperewindungen wurden bei 240 Amp. gleich 2160 pro Kreis genommen. Aus der Belastungscharakteristik sehen wir, daß die Klemmenspannung von 2500 Volt bei einem Strom von 239,5 Amp. eintritt.

Verluste: Es wurden aus Kurve *IV* für verschiedene Stromstärken die zugehörigen induzierten EMKe entnommen und hieraus die Sättigungen und die Eisenverluste gerechnet.

Digitized by Google

Es ergeben sich die Stromwärmeverluste im Anker

$$W_{ka} = J_a^2 R_a = J_a^2 \cdot 0{,}183,$$

die Erregerverluste zu

$$W_H = J_a^2 R_h = J_a^2 \cdot 0{,}0605,$$

die Übergangsverluste am Kommutator zu

$$W_u = 2 \Delta P f_u J_a \simeq 2 \cdot J_a.$$

Der Belastungscharakteristik (Kurve *III*, Fig. 381) wurden dann für die verschiedenen Stromstärken, für welche die Verluste gerechnet sind, die zugehörigen Klemmenspannungen P entnommen; aus welchen sich die abgegebene Leistung PJ_a ergibt. In Fig. 382 sind die verschiedenen Verluste in Abhängigkeit von der Leistung aufgetragen. Es stellt die Kurve W_e die Eisenverluste, W_{ka} die Stromwärmeverluste in der Ankerwicklung, W_H die Stromwärmeverluste in der Erregerwicklung, W_u die Übergangsverluste am Kommutator und W_t die totalen Verluste (ausschließlich Reibung) dar. Außerdem sind die Zahnverluste (Kurve W_{ez}) eingetragen. Aus der Kurve W_t sieht man, daß die Verluste fast proportional der Leistung zunehmen, so daß der Wirkungsgrad bei allen Belastungen ungefähr der gleiche ist.

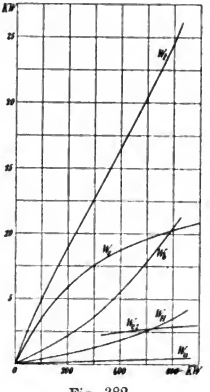


Fig. 382.

Bei 600 KW Leistung finden wir folgende Verluste:

Eisenverluste	$W_e =$	10300 Watt
Stromwärmeverluste in der Ankerwicklung	$W_{ka} =$	10450 „
Stromwärmeverluste in der Erregerwicklung	$W_H =$	3500 „
Übergangsverluste am Kommutator	$W_u =$	480 „
Totale Verluste (ausschließlich Reibung)	$W_t =$	24730 Watt
Eisenverluste in den Zähnen	$W_{ez} =$	2900 Watt

In Fig. 383 ist der Wirkungsgrad der Maschine in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung aufgetragen (Kurve *I*). Man sieht, daß er für 50 KW, d. h. für $^1/_{12}$ Vollast noch 95% beträgt.

Digitized by Google

Denkt man sich eine Nebenschlußmaschine, welche bei Vollast die gleichen Verluste hat wie die berechnete Hauptstrommaschine und ermittelt man für diese Maschine die Wirkungsgrad-Kurve, indem man annimmt, daß die Eisenverluste konstant bleiben, die Übergangsverluste sich proportional der abgegebenen Leistung und die Stromwärmeverluste sich proportional dem Quadrate der abgegebenen Leistung ändern, so erhält man die Kurve *II*, Fig. 383. Ein Vergleich der Kurven *I* und *II* zeigt, daß der Wirkungsgrad bei kleineren Belastungen bei der Hauptstrommaschine erheblich höher ist als bei der Nebenschlußmaschine.

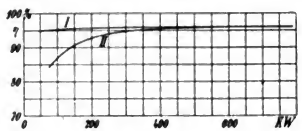


Fig. 383.

Erwärmung des Ankers: Die spezifischen Abkühlungsflächen werden:

$$a_a = 10{,}8 \text{ cm}^2/\text{Watt}; \quad a_e = 20{,}9 \text{ cm}^2/\text{Watt}; \quad a_{st} = 14{,}7 \text{ cm}^2/\text{Watt}.$$

Temperaturerhöhung rund

$$T_a = \frac{C_a}{a_a} = \frac{450}{10{,}8} = 41{,}5^0 \text{ C}.$$

Kommutation: Bezüglich Kommutation ist die Hauptstrommaschine bedeutend günstiger als die Nebenschlußmaschine, da die kommutierende Feldstärke mit zunehmendem Strome zunimmt. Würde die von den Hauptmagneten herrührende Feldstärke proportional dem Strome zunehmen, so würde es eine Einstellung der Bürsten geben, bei welcher in der neutralen Zone für jede Belastung die resultierende Feldstärke gleich B_N wäre. Es wäre dann für jede Belastung

$$B_o = B_N + B_q.$$

Wie wir sehen werden, tritt diese Bedingung nicht für jede Belastung ein, und es ergibt sich aus der Differenz $B_N + B_q - B_o$ ein zusätzliches Feld, mit welchem sich die Kurzschlußspannung berechnen läßt.

Digitized by Google

Nach Gl. 141, S. 460, Bd. I ist

$$B_o = \frac{AW_l + AW_x - AW_p}{1{,}6\, a_x}\left(\frac{b_{x1}}{\delta_1} - \frac{b_{x2}}{\delta_2}\right).$$

Nehmen wir zunächst an, daß die Polspitzen ungesättigt sind, so ist B_o proportional $AW_l + AW_x$. Um die Abhängigkeit der Feldstärke B_o von der Stromstärke zu finden, wurden daher die Amperewindungen $AW_l + AW_x$ in Abhängigkeit des Stromes ermittelt (Kurve V, Fig. 381). Die Konstruktion dieser Kurve geschieht in folgender Weise. Zu einem Strom $\overline{OA}$ gehört eine Amperewindungszahl pro Kreis $\overline{FG}$ und von dieser Amperewindungszahl ist der Teil $\frac{\overline{DC}}{\overline{DB}} \cdot \overline{FG}$ gleich $AW_l + AW_x$. Es stellt somit $\overline{DC}$ im Amperewindungsmaßstab $AW_l + AW_x$ dar. Tragen wir jetzt auf der Geraden AB von A aus $\overline{AE} = \overline{DC}$ auf, so haben wir in E einen Punkt der gesuchten Kurve. Ein Blick auf die Kurve V zeigt, daß $AW_l + AW_x$ nicht proportional dem Strome ist. In einem bestimmten Maßstabe gibt uns die Kurve V auch die Abhängigkeit der Feldstärke B_o von der Stromstärke J. Der Maßstab ist abhängig von der Bürstenstellung, und wir können diese so wählen, daß die Abhängigkeit von $B_N + B_q$ und J z. B. durch die Gerade OF dargestellt wird. Diese Gerade ist so gewählt, daß der größte positive und negative Wert der fehlerhaften Feldstärken $(B_N + B_q) - B_o$ einander gleich sind und somit die absolute Größe der fehlerhaften Feldstärke ein Minimum ist.

Bei 200 Amp. schneidet die Gerade die Kurve V und bei dieser Belastung ist somit $B_o = B_N + B_q$. Wir wollen jetzt die Bürstenstellung aufsuchen, für welche bei 200 Amp. Belastungsstrom die Bedingung $B_o = B_N + B_q$ erfüllt ist. Setzen wir in der oben erwähnten Gleichung für B_o, a_x gleich b_{x1} und vernachlässigen wir die Leitfähigkeit $\frac{b_{x2}}{\delta_2}$, so wird

$$B_o = \frac{AW_l + AW_x - AW_p}{1{,}6\, \delta_1}.$$

Nach Gl. 142, Seite 461, Bd. I ergibt sich:

$$B_q = \frac{b_x AS - \frac{1}{2} AW_p}{0{,}8\, \delta_a} + \frac{AS(\tau - b_x)}{0{,}8\, \delta_b}.$$

Digitized by Google

Vernachlässigt man den Teil

$$\frac{AS(\tau - b_z)}{0{,}8\,\delta_b}$$

und setzt man $\delta_a = \delta_1$, so wird

$$B_q = \frac{b_z\,AS - \frac{1}{2}\,AW_p}{0{,}8\,\delta_1} = \frac{2\,b_z\,AS - AW_p}{1{,}6\,\delta_1}.$$

Bei 200 Amp. ist $B_o = B_N + B_q$ und somit

$$\frac{AW_l + AW_z - AW_p}{1{,}6\,\delta_1} = \frac{2\,b_z\,AS - AW_p}{1{,}6\,\delta_1} + B_N$$

und somit

$$\frac{1}{1{,}6\,\delta_1} = \frac{B_N}{AW_l + AW_z - 2\,b_z\,AS} \quad . \quad . \quad . \quad (148)$$

Hat man aus dieser Gleichung $\frac{1}{1{,}6\,\delta_1}$ ermittelt, so kann man für jede Belastung die zusätzliche Feldstärke berechnen. Diese ist gleich:

$$(B_N + B_q) - B_o = B_N + \frac{2\,b_z\,AS - AW_p}{1{,}6\,\delta_1} = \frac{AW_l + AW_z - AW_p}{1{,}6\,\delta_1} =$$

$$= B_N + \frac{2\,b_z\,AS - (AW_l + AW_z)}{1{,}6\,\delta_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (149)$$

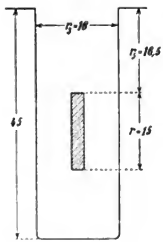


Fig. 384.

Aus den Gleichungen 148 und 149 geht hervor, daß sowohl δ_1 wie die zusätzliche Feldstärke unabhängig von AW_p, d. h. unabhängig von der Sättigung der Polspitzen ist.

Wir wollen jetzt B_N berechnen.

Nach Fig. 384 ist

$$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3\,r_3} + \frac{r_5}{r_3}\right) =$$

$$= 1{,}25\left(\frac{15}{3 \cdot 16} + \frac{16{,}5}{16}\right) = 1{,}68$$

Digitized by Google

$$\lambda_{k_s} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi t}{2 r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 31{,}2}{2 \cdot 16} = 0{,}45$$

$$\lambda_s = 0{,}8; \quad l_s = 88 \text{ cm}; \quad \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 0{,}8 \frac{88}{34{,}7} = 2{,}03$$

$$\lambda_{N_s} = \lambda_n + \lambda_{k_s} + 0{,}5 \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 3{,}15.$$

Ist die Lamellenzahl auf das n'-fache vermehrt, so wird bei 200 Amp. ($AS = 192$)

$$B_N = \frac{2 t_1 AS \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D n'} = \frac{2 \cdot 31{,}2 \cdot 192 \cdot 3{,}15}{31{,}2 + 12{,}3 - 2{,}6} = 920.$$

Bei dieser Belastung ist $B_o = B_N + B_q$, und indem wir $2 b_z AS \simeq b_i AS$ setzen, wird

$$\frac{1}{1{,}6 \delta_1} = \frac{B_N}{AW_i + AW_z - 2 b_z AS} = \frac{920}{13700 - 44 \cdot 192} = 0{,}175.$$

Bei Vollast (240 Amp.) ergibt sich die fehlerhafte Feldstärke zu:

$$(B_N + B_q) - B_o = B_N + \frac{2 b_z AS - (AW_i + AW_z)}{1{,}6 \delta_1} =$$

$$= 920 \frac{240}{200} + (44 \cdot 230 - 15800)\, 0{,}175 = 110.$$

Die durch diese Feldstärke induzierte Kurzschlußspannung

$$\Delta e = S_k \frac{N}{K} l_i v B_N \cdot 10^{-6} \text{ Volt.}$$

S_k ist für die Wicklung mit n'-fach vermehrter Lamellenzahl

$$S_k = \left(\frac{b_1}{\beta}\right)_+ \frac{p}{a} \frac{1}{n'} = \left(\frac{10}{4{,}22}\right)_+ \frac{4}{1} \cdot \frac{1}{2} = 6.$$

Es wird somit

$$\Delta e = 6 \cdot 2 \cdot 34{,}7 \cdot 25{,}2 \cdot 110 \cdot 10^{-6} = 1{,}15 \text{ Volt.}$$

Digitized by Google

Es ist noch die effektive Reaktanzspannung e_s zu kontrollieren.

Die Ankerkonstante wird

$$\frac{N}{K} l_i v\, AS \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 34{,}7 \cdot 25{,}2 \cdot 230 \cdot 10^{-6} = 0{,}402$$

und weiter die Leitfähigkeiten

$$\lambda_{nz} = 1{,}25 \left(\frac{r_5}{r_3}\right) = 1{,}25 \left(\frac{16{,}5}{16}\right) = 1{,}29$$

$$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi (\tau - b_i)}{r_1} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi \cdot 18{,}8}{1{,}5} = 1{,}47$$

$$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 4{,}79$$

b_r ist für Wicklungen mit n'-fach vermehrter Lamellenzahl

$$b_r = b_1 + \beta \left[1 - (1 + p_w) \frac{a}{p} n'\right] = 12{,}11\,.$$

Es wird dann

$$e_s = (1 + p_w) \frac{\beta}{b_r} \frac{N}{K} l_i v\, AS \lambda_{Lz} 10^{-6} =$$

$$= \frac{4{,}22}{12{,}11} \cdot 2 \cdot 34{,}7 \cdot 25{,}2 \cdot 230 \cdot 4{,}79 \cdot 10^{-6} = 0{,}67 \text{ Volt.}$$

Da der Wert von e_s ziemlich an der zulässigen Grenze ist, so wollen wir noch die Reaktanzspannungen e_{rs} und e_{rmax} berechnen.

$$e_{rs} = 2 \left(\frac{N}{K} l_i v\, AS \cdot 10^{-6}\right) \frac{l_1 \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D n'}$$

$$= 2 \cdot 0{,}402 \cdot \frac{31{,}2 \cdot 3{,}15}{31{,}2 + 12{,}3 - 2{,}6} = 1{,}93 \text{ Volt.}$$

Da hier $u_k = u_n$, wird

$$C_N = \frac{\frac{u_n}{2} - 1 + \varepsilon}{\frac{b_r}{\beta}}$$

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{2} \left(1 + \frac{K}{p} - y_1\right) = \pm \frac{1}{2} \left(1 + \frac{483}{4} - 121\right) = \frac{3}{8}$$

Digitized by Google

und somit

$$C_N = \frac{\frac{6}{2} - 1 + \frac{3}{8}}{\frac{12,11}{4,22}} = 0,83.$$

Ferner ist

$$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0,5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i} = 1,29 + 1,47 + 1,02 = 3,78$$

und somit

$$\frac{\lambda_{Ns} + C_N \lambda_{Nz}}{\lambda_{Ns}} = \frac{3,15 + 0,83 \cdot 3,78}{3,15} = 2,0.$$

Der Maximalwert der Reaktanzspannung einer Spule wird somit

$$e_{rmax} = 2,0 \cdot 1,93 = 3,86 \text{ Volt.}$$

Da sowohl e_s als die Abweichung $e_{rmax} - e_{rs}$ groß sind, so wird die Maschine an der Funkengrenze arbeiten. Mit einem glatten Trommelanker würde man bessere Verhältnisse für die Kommutation erreichen, jedoch würde die Maschine ein größeres Gewicht erhalten.

Digitized by Google

Siebzehntes Kapitel.

78. Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung von Gleichstrommaschinen. — 79. Tabelle über Hauptabmessungen und berechnete Größen ausgeführter Maschinen.

78. Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung von Gleichstrommaschinen.

Die nachfolgende Zusammenstellung der Formeln in der Tabelle VI entspricht einem Berechnungsformular, wie es der Verfasser für die Studierenden der Elektrotechnik an der Karlsruher Hochschule eingeführt hat. Die Formeln sind so gruppiert, daß eine leichte Übersicht und Prüfung der berechneten Größen möglich ist. Ihre Aufeinanderfolge entspricht daher nicht ganz dem Gange der Rechnung. Die hinter den Bezeichnungen und Formeln stehenden Zahlen bezeichnen die Seiten des Buches, auf welchen nähere Erläuterungen zu finden sind.

In die Tabelle sind die Berechnungen folgender Maschinen eingetragen:

I. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Regulierdynamo mit Wendepolen, 75 KW, 680 Umdr. pro Min., 0—220 Volt, 345 Amp. (Siehe S. 179.)

II. Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. Nebenschlußgenerator mit Wendepolen, 1100 KW, 94 Umdr. pro Min., 630 Volt, 1750 Amp. (Siehe S. 188.)

III. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Turbogenerator mit Wendepolen, 65 KW, 3000 Umdr. pro Min., 115 Volt, 565 Amp. (Siehe S. 183.)

IV. Maschinenfabrik Oerlikon. Turbogenerator mit Wendepolen, 500 KW, 2000 Umdr. pro Min., 440—550 Volt, 1140—910 Amp. (Siehe S. 186.)

V. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie. Turbogenerator mit Kompensationswicklung, 250 KW, 3000 Umdr. pro Min., 450—650 Volt, 555—384 Amp. (Siehe S. 193.)

Digitized by Google

Gleichstrommaschine.[1])

Hauptstrom — Nebenschluß — Doppelschluß — Dynamo — Motor

PS KW Umdrehungen pro Minute.....

Amp. Volt Polzahl Type

Besondere Bedingungen für die Ausführung: .....

.....

.....

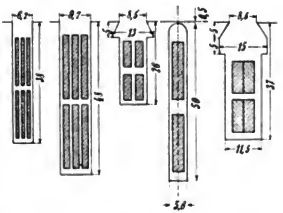
[1]) Das auf Schreibpapier gedruckte Berechnungsformular mit drei nicht ausgefüllten vertikalen Spalten kann gegen Einsendung des Betrages von 20 Pfg. franko durch die Verlagsbuchhandlung von Julius Springer in Berlin N. 24, Monbijouplatz 3, bezogen werden.

Digitized by Google

Tabelle VI.

	I	II	III	IV	V	
Leistung	76	1100	65	500	250	KW
Umdrehungen pro Min.	680	94	3000	2000	3000	
Klemmenspannung	0·220	630	115	440-550	450-650	Volt
Stromstärke	345	1750	565	1140 bis 910	555-384	Amp.
Anker.						
$\frac{6\cdot10^{11}}{x_i B_l A S} = \frac{D^2 l_i n}{KW}$ (S. 234, Bd. II)	46	25,5	108	113	138	10^4
$D^2 l_i$	5,1	296	2,35	28,4	11,5	10^4
Eisendurchmesser außen D	48	320	36	80	48	cm
„ innen D_i	28	280	—	38	25	„
Ideelle Eisenlänge l_i (S. 236, Bd. II)	22	29	18	44,3	50	„
Eisenlänge ohne Luftschlitze l	20	27	16	34,4	46	„
Eisenlänge mit Luftschlitzen l_1 (S. 236, Bd. II)	23	30	19	42,8	52	„
Zahl der Luftschlitze n_s	3.	3	3	7	4	
Eisenhöhe (ohne Zahnhöhe) h (S. 245, Bd. II)	6,2	15,2	7,05	15,95	7,8	„
Umfangsgeschwindigkeit v (S. 217, Bd. II.)	17,1	15,7	56,4	83,8	75,4	m/sec
Wicklungsart (S. 212, Bd. II u. S. 75, Bd. I)	Parallel	Reihen-Parallel	Zweifach Parallel	Parallel	Parallel	Wicklung
Halbe Anzahl der Ankerzweige a (S. 70, Bd. I)	3	5	4	3	1	
„ „ „ Pole p (S. 221, Bd. II)	3	10	2	3	1	
Erregerstromstärke im Nebenschluß i_n	5,9	16	—	—	—	Amp.
Stromstärke pro Zweig $\frac{J+i_n}{2a} = i_a$ (S. 239, Bd. II)	57,5	177	70,5	187	278	„
Spezifische Belastung AS (S. 225, Bd. II)	233	375	125	313	265	$\frac{\text{Amp.}}{\text{cm}}$
Anzahl der Ankerdrähte $N = \frac{\pi D \cdot AS}{i_a}$ (S. 238, Bd. II)	612	2130	200	420	144	
Kommutatorschritt (Wellenwicklung) $y_k = \frac{K+a}{p}$ (S. 75, Bd. I)	—	106	—	—	—	
Wicklungsschritt: hintere Seite (Spulenweite) y_1 (S. 241, Bd. II u. S. 101, Bd. I)	97	109	49	71	—	
Wicklungsschritt: Kommutatorseite y_2 (S. 241, Bd. II u. S. 101, Bd. I)	95	103	53	69	—	
Verkürzung der Spulenweite $(1+\frac{K}{p}-y_1)$ (S. 362, Bd. I)	6	— 1,5	2	—	—	
Stromdichte im Ankerdraht s_a (S. 241, Bd. II)	3,83	4,4	3,55	3,94	4	$\frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$
Draht-Stab-Querschnitt q_a (S. 19 u. 241, Bd. II)	15	40	20	47,6	70	mm^2
Draht-Stab-Dimensionen nackt	1×15	2×20	2,5×8	2,8×17	2 (3,5×10)	mm
Draht-Stab-Dimensionen isoliert	—	—	—	—	—	mm
Länge einer halben Ankerwindung $l_a \sim l_i + 1{,}4\,\tau + 5$ cm	57	100	65	108	145	cm

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Leiter pro Nut u_n (S. 186, Bd. I)	6	6	4	2	2	
Nutenzahl Z	102	355	50	210	72	
Nutenform und Anordnung der Leiter (S. 26—35 u. 243, Bd. II)						
Zahl der Nuten pro Pollücke: $\frac{Z}{2p}(1-\alpha_i)$.	3,7	5,8	5	12,5	13,8	
Zahnteilung am Umfang $t_1 = \frac{\pi D}{Z}$	14,8	28,3	22,6	12	20,9	mm
„ „ Fuß t_2	12,4	27,5	18,7	10,45	17,7	„
Zahndicke „ Umfang z_1	8,6	18,6	14,1	—	12,4	„
„ „ Fuß z_2	6,2	17,8	10,2	4,65	6,2	„
Kleinste Zahndicke z_{min}	6,2	17,8	10,2	4,65	5	„
Dicke des Eisenbleches Δ (S. 37, Bd. II) . . .	0,5	0,5	0,35	0,3	0,35	„
Isolation zwischen den Blechen $100\,(1-k_i)$ (S. 38, Bd. II)	10	10	15	15	15	%
Effektiver Eisenquerschnitt lhk_i	111	370	96	465	305	cm²
Kraftlinienlänge L_a	20	50	20	40	46	cm
Äquipotential-Verbindungen: (S. 163, Bd. I)						
Potentialschritt y_p (S. 173 u. 178, Bd. I)						
für Schleifenwicklung $y_p = \frac{K}{p}$	102	—	50	70	—	
für Wellenwicklung $y_p = x y_k \pm 1$, . . . wo $K = p y_k \pm a$	—	213	—	—	—	
Gesamtzahl der mit Äquipotentialverbindungen vers. Lamellen (S. 113, Bd. II) . . .	—	—	—	—	—	
(Das Zahlenschema für die Äquipotentialverbindungen ist aufzustellen.) (S. 199, Bd. I)						
Querschnitt einer Äquipotentialverbindung (S. 113, Bd. II)	3,5	9,6	—	5,3	—	mm²
Mechanische Beanspruchungen:						
Material der Drahtbänder (S. 104, Bd. II) .	—	—	—	—	—	
Durchmesser der Drähte	—	—	—	—	—	mm
Anzahl der Bänder	—	—	—	—	—	

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Breite eines Bandes	—	—	—	—	—	cm
Beanspruchung der Drähte						
$\sigma = 0{,}01\,\gamma \cdot v^2 + \frac{G_{ka}\,D}{4\pi\,F_B}\left(\frac{n}{300}\right)^2$ (S. 307, Bd. II)	—	—	—	—	—	kg/cm²
Material der Stirnkappen	—	—	—	—	—	
Beanpruchung der Stirnkappen						
$\sigma = 0{,}09\,v^2 + \frac{G_{ka}\,D}{4\pi\,F_k}\left(\frac{n}{300}\right)^2$ (S. 307, Bd. II) .	—	—	670	1235	940	kg/cm²
Material der Nutenkeile (S. 105, Bd. II) . .	—	—	Holz	—	Holz	
Beanspruchung der Nutenkeile:						
auf Biegung: $\sigma_b = \frac{6\,C_n\,(r_1 + r_8)}{8 \cdot l\,h_k^2}$ (S. 307, Bd. II)	—	—	100	—	55	kg/cm²
Beanspruchung des Ankereisens:						
$\sigma = 0{,}08\,v^2 + \frac{(G_z + G_{ka})\,D}{4\pi\,k_2\,l\,h}\left(\frac{n}{300}\right)^2 \cdot \frac{2}{1 + \frac{D_i}{D_a}}$ (S. 305, Bd. II)	—	—	280	580	520	„
Beanspruchung des Zahnkopfes:						
auf Biegung: $\sigma_b = \frac{6\,C_n\,(r_8 - r_1)}{8 \cdot k_2\,l\,(r_4 + r_8)^2}$ . .	—	—	235	65	185	kg/cm²
„ Scheerung: $\tau = \frac{C_n}{2 \cdot k_2\,l\,(r_4 + r_8)}$ . .	—	—	17,5	25	19	„
$\sigma = 0{,}35\,\sigma_b + 0{,}65\,\sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot (\alpha_0\,\tau)^2}$ (S. 306, Bd. II)	—	—	235	78	185	„
Beanspruchung des Zahnfußes:						
$\sigma = \frac{(G_z + G_{ka}) \cdot D}{2 \cdot Z\,z_4\,k_2\,l}\left(\frac{n}{300}\right)^2$ (S. 305, Bd. II) .	—	—	65	115	165	„
Beanspruchung bei z_{min}:						
$\sigma = \frac{(G_z' + G_{ka}) \cdot D}{2\,Z\,z_{min}\,k_2\,l}\left(\frac{n}{300}\right)^2$ (S. 305, Bd. II) . .	—	—	—	—	110	„
Kommutator. (S. 46 u. 247, Bd. II).						
Material (S. 247, Bd. II)	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	Kupfer	
Durchmesser D_k	38	220	18	40	26	cm
Nutzbare Länge L_k	14,5	19,5	39	37	42	„
Anzahl der Lamellen K (S. 240, Bd. II) . . .	306	1065	100	210	72	
Breite einer Lamelle außen (S. 47, Bd. II) . .	3,1	5,7	4,85	4,98	9,8	mm
Dicke der Isolation (S. 48, Bd. II)	0,8	0,8	0,8	1	1,5	„
Art der Isolation	—	—	Mikanit	Mikanit	Megohmit	
Maximale Spannung zwischen zwei Lamellen:						
$P_{dk} = \frac{\pi\,a\,P}{K} \cdot \left(\frac{p}{a}\right)_+$ (S. 238, Bd. I u. S. 240, Bd. II)	6,8	18,5	7,2	24,7	19,7	Volt
Umfangsgeschwindigkeit v_k (S. 217, Bd. II) . .	13,5	10,8	28,2	42	40,8	m/sec

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Biegungsbeanspruchung der Lamellen $\sigma = \frac{M}{W}$	—	—	510	—	1180	kg/cm²
Material der Schrumpfringe	—	—	Stahl	—	Stahl	
Zahl der Schrumpfringe	—	—	4	3	3	
Beanspruchung der Schrumpfringe durch die Fliehkraft: $\sigma = 0{,}08\,v^2 + \alpha \frac{G_{kk}\, D_k}{4 \cdot \pi\, F_R} \left(\frac{n}{300}\right)^2$ (S. 308, Bd. II)	—	—	580	—	830	kg/cm²
Bürsten: (S. 53, Bd. II) Material	Kohle	Kohle	Kohle	Endruw.	Endruw.	
Anzahl der Stifte p_1	6	20	4	6	2	
Stromstärke pro Stift	115	177	283	374	555	Amp.
Bürsten pro Stift	4	5	7	6	5	
Dimensionen der Bürsten: Breite b_1 (S. 251, Bd. II) . . .	1,5	2,0	1,6	1,4	1,2	cm
Dimensionen der Bürsten: Länge	3,0	3,0	3,0	4,2	4	„
Fläche aller Bürsten F_b	108	600	135	35,3	56,8	cm²
Stromdichte (S. 251, Bd. II)	6,4	5,9	8,4	10,6	23	$\frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$
Dimensionen der vorgeschobenen Bürste: Breite	—	—	—	—	1,1	cm
Dimensionen der vorgeschobenen Bürste: Länge	—	—	—	—	4	„
Zahl derselben pro Bürstenstift	—	—	—	—	1	
Magnetsystem.						
a) Hauptpole.						
Polbohrung	48,8	321,5	36,8	84	50	cm
Luftspalt $\delta \geq \frac{(1{,}2 \text{ bis } 2)\, b_i\, AS - AW_z}{1{,}6\, k_i\, B_i}$ (S. 253, Bd. II)	4	7,5	4	20	10	mm
$k_i = \frac{t_1}{z_1 + X\delta}$ (S. 271, Bd. I)	1,13	1,08	1,09	1	1,11	
$\nu = \frac{t_1 - z_1}{\delta}$ (S. 272, Bd. I)	1,55	1,3	2,1	—	0,85	
Polschuhe: Material (S. 115, Bd. II)	Blech	Stahlguß	Blech	Blech	Blech	
Länge in der Achsenrichtung l_p	23	30	19	41	45,2	cm
Polbogen b_p	19	33,5	17	10	44,6	„
Ideeller Polbogen b_i (S. 267, Bd. I)	19,4	34,0	17	27	49,5	„
Polteilung $\frac{\pi D}{2p} = \tau$	25,1	50,3	28,2	41,8	78,5	„
Verhältnis $\frac{b_i}{\tau} = \alpha_i$ (S. 224, Bd. II)	0,775	0,675	0,6	0,645	0,63	
„ $\frac{l_i}{b_i}$	1,14	0,85	1,06	1,64	1,01	
Höhe des Polschuhs h_p	1,2	1	2	—	—	cm

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Magnetschenkel: Material (S. 115, Bd. II) . .	Blech	Stahlguß	Schmied-eisen	Schmied-eisen	—	
Länge in der Achsenrichtung	23	33	—	36	—	cm
Breite — Durchmesser	11,5	25	14,5	7	—	„
Radiale Höhe einschließl. Polschuhe . . .	20,8	33	17	23	—	„
Querschnitt Q_m	252	690	165	252	—	cm^2
Kraftlinienlänge L_m	44	66	35	46	—	cm
b) Wendepole. (S. 208 u. 281, Bd. II.)						
Polschuh: Material (S. 119, Bd. II)	Schmied-eisen	Stahlguß	Schmied-eisen	Schmied-eisen	Blech	
Breite b_w	2,5	3,8	4	5	10	cm
Ideelle Breite b_{wi}	5,3	6	5,8	7	15	„
Länge in der Achsenrichtung l_w	17	22,5	14	28	50	„
Ideelle Länge l_{wi}	18,2	24	15,2	31	50	„
Luftzwischenraum δ_w (S. 287, Bd. II)	4	5	4	10	10	mm
Magnetschenkel: Material (S. 119, Bd. II) . .	Schmied-eisen	Stahlguß	Schmied-eisen	Schmied-eisen	—	
Länge in der Achsenrichtung	17	22	—	28	—	cm
Breite — Durchmesser	3 u. 5	4 u. 6	5	4,0	—	„
Querschnitt Q_{wm} (S. 282, Bd. II)	51 u. 85	88 u. 132	49	112	—	cm^2
Kraftlinienlänge L_{wm}	45	68	34	46	—	cm
c) Joch: Material (S. 116, Bd. II)	Gußeisen	Gußeisen	Stahlguß	Stahlguß	—	
Länge in der Achsenrichtung	40	—	28	36	—	cm
Radiale Höhe	7,5	—	6,5	3,5	—	„
Querschnitt Q_j	260	750	115	130	—	cm^2
Kraftlinienlänge L_j	52	65	60	70	—	cm
Maschinen mit Kompensationswicklung.						
Äußerer Durchmesser des Statoreisens D_a'	—	—	—	—	87	cm
Innerer „ „ „ D_i'	—	—	—	—	50	„
Eisenlänge ohne Luftschlitze	—	—	—	—	45,2	„
„ mit „	—	—	—	—	50	„
Zahl der Luftschlitze	—	—	—	—	4	
Zahl der Nuten zur Unterbringung der Magnetwicklung	—	—	—	—	4	
Dimensionen derselben { mittlere Breite	—	—	—	—	16	cm
Dimensionen derselben { Höhe	—	—	—	—	9	„
Zahl der Nuten zur Unterbringung der Kompensationswicklung	—	—	—	—	14	

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Dimensionen derselben { Breite	—	—	—	—	2,3	cm
Dimensionen derselben { Höhe	—	—	—	—	9,5	„
Mittlerer Magnet-Querschnitt Q_m	—	—	—	—	1500	cm^2
Mittlere Stärke des Wendepolzahnes	—	—	—	—	8,7	cm
Mittlerer Querschnitt des Wendepolzahnes Q_{mw}	—	—	—	—	374	cm^2
Zahnhöhe $^1/_2 L_m = {}^1/_2 L_{mw}$	—	—	—	—	9,5	cm
Eisenhöhe ohne Zahnhöhe (Jochhöhe)	—	—	—	—	9	„
Querschnitt Q_j	—	—	—	—	375	cm^2
Kraftlinienlänge L_j	—	—	—	—	100	cm
Blechdicke	—	—	—	—	0,5	mm
Berechnung des Wendefeldes.						
$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{8\,r_3}+\frac{r_5}{r_3}+\frac{r_7}{r_8}+\frac{2\,r_6}{r_4+r_8}+\frac{r_4}{r_3}\right)$ (S. 273, Bd. II)	3,63	3	2,14	4,4	2,2	
$\lambda_{ks} = 0{,}92 \log_{10}\frac{\pi t_1}{2 r_1}$ (S. 273, Bd. II)	0,53	0,61	0,57	0,735	0,54	
$\lambda_s = 0{,}46 \log_{10}\frac{2 l_s}{U_s}$ (S. 273, Bd. II)	0,8	0,8	0,8	0,46	0,77	
$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\frac{l_s}{l_i}\,\lambda_s$ (S. 273, Bd. II)	4,78	4,58	3,73	5,47	3,46	
$C = \frac{A W_p}{b_i A S}$ (S. 462, Bd. I u. S. 291, Bd. II)	0,5	0,5	0,5	—	—	
λ_{qo} (S. 462, Bd. I u. S. 291, Bd. II)	3,5	2,5	2,5	3	—	
$B_{wi} = \frac{2 \cdot t_1 A S \lambda_{Ns}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p}\cdot\beta_D}\,\frac{l_1}{l_w} +$ $+ 2 A S \lambda q_o \frac{l_1 - l_w}{l_w}$ (S. 281, Bd. II)[1]	2190	3085	1110	3230	1740	
$\Phi_{wa} = B_{wi} b_{wi} l_{wi}$	0,21	0,445	0,098	0,7	1,3	10^6
σ_k (S. 566, Bd. I u. S. 282, Bd. II)	1,5	1,6	1,4	1,5	1,2	
$\Phi_{wm} = \sigma_k \Phi_{wa}$ (S. 282, Bd. II)	0,315	0,71	0,137	1,05	1,56	10^6
Berechnung der Magnetisierungskurve.[2]						
$E =$	2,0	630	115	450	650	Volt
Kraftfluß $\Phi = \frac{a}{N}\cdot\frac{60}{p n} E 10^8$ (S. 61, Bd. I)	3,18	9,45	2,3	3,2	9,03	10^6
Induktion im Luftzwischenraum $B_l = \frac{\Phi}{b_i l_i}$	7450	9000	7500	2680	3650	
Induktion im Anker $B_a = \frac{\Phi}{2 l h k_2}$	14200	12750	12000	3440	14800	
B_{zimax} (S. 244, Bd. II)	21800	17400	22000	9900	19400	
B_{zwmax} (S. 280, Fig. 245, Bd. I)	21000	17400	21100	—	18900	
Streuungskoeffizient σ angenähert (S. 292, Bd. I)	1,18	1,15	1,18	1,12	1,05	

[1]) Bei p Wendepolen siehe Gl. 87a, S. 281.
[2]) Magnetisierungskurven verschiedener Eisensorten siehe Tafel XIII.

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
$\Phi_m = \sigma\,\Phi_a$	3,75	10,9	2,7	3,58	9,5	10^6
$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m}$	14900	15800	16300	14200	6350	
$B_j = \frac{\Phi_m}{2\,Q_j}$	7200	7250	11700	13800	12600	
$AW_t = 1{,}6\,B_t\,\delta\,k_1$ (S. 268, Bd. I)	5400	12400	—	8600	—	
$AW_a = a\,w_a\,L_a$ (S. 282, Bd. I)	360	500	—	—	—	
$AW_z = a\,w_z\,L_z$ (S. 277, Bd. I)	1080	765	—	50	—	
$AW_m = a\,w_m\,L_m$ (S. 289, Bd. I)	1200	2970	—	805	—	
$AW_j = a\,w_j\,L_j$ (S. 282, Bd. I)	2500	3180	—	1050	—	
AW_{ko} (S. 284, Bd. I)	10540	19815	—	10505	—	
$AW_{to} = p\,AW_{ko}$	31620	198150	—	31515	—	
Berechnung der Erregung bei Belastung.						
Klemmenspannung P	220	630	115	450	450	Volt
Stromstärke J	345	1750	565	1120	555	Amp.
Induzierte EMK E_a (S. 256, Bd. II)	228,5	656	118	462	470	Volt
$\Phi_b = \frac{a}{N}\cdot\frac{60}{p\,n}\,E_a\,10^8$	3,3	9,8	2,36	3,3	6,55	10^6
$B_t = \frac{\Phi_b}{b_t\,l_t}$ (S. 225, Bd. II)	7730	9950	7780	2760	2650	
B_a (S. 245, Bd. II)	—	—	—	—	—	
$\Phi_a' = \frac{1}{2}\cdot(\Phi_b + \Phi_{wa})$ (S. 282, Bd. II)	1,76	5,12	1,23	2	3,92	10^6
$\Phi_a'' = \frac{1}{2}\cdot(\Phi_b - \Phi_{wa})$ (S. 282, Bd. II)	1,55	4,68	1,13	1,3	2,63	10^6
B_a'	15900	13800	12700	4300	12800	
B_a''	1400	12700	11800	2800	8600	
$B_{zt\,max}$	22600	18100	22800	10200	14000	
$B_{zw\,max}$	21500	18000	21650	10200	14000	
$\sigma_b = 1 + \frac{2(AW_{to}+AW_{zo}+AW_{eo}+AW_r)}{\Phi_b}\cdot(\Sigma\lambda_p + \Sigma x\lambda_m + \Sigma x\lambda_j)$ (S. 291, Bd. I)	1,18	1,2	1,2	1,12	1,05	
$\Phi_m = \sigma_b\cdot\Phi_b$	3,9	11,75	2,83	3,7	6,9	10^6
B_m (S. 257, Bd. II)	15500	17000	17100	14700	4600	
B_j (S. 257, Bd. II)	—	—	—	—	—	
$\Phi_j' = \frac{1}{2}(\Phi_m + \Phi_{wm})$ (S. 282, Bd. II)	2,11	6,23	1,47	2,4	4,23	10^6
$\Phi_j'' = \frac{1}{2}(\Phi_m - \Phi_{wm})$ (S. 282, Bd. II)	1,79	5,52	1,34	1,3	2,67	10^6
B_j'	8100	8320	12800	18300	11300	
B_j''	6900	7370	11700	10000	7100	

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
$AW_l = 1{,}6\, B_l\, \delta\, k_1$	5580	12900	—	8850	—	
$AW'_a = \frac{1}{2} L_a\, aw_a'$	324	220	275	—	230	
$AW_a'' = \frac{1}{2} L_a\, aw_a''$	170	250	70	—	32	
$AW_z = aw_z\, L_z$	1470	1060	—	55	—	
$AW_m = aw_m\, L_m$	1430	4950	—	990	—	
$AW_j' = \frac{1}{2} L_j\, aw_j'$	1720	2240	—	4030	—	
$AW_j'' = \frac{1}{2} L_j\, AW_j''$	1120	1632	—	175	—	
AW_r (S. 327, Bd. I)	—	500	—	4675[1])	—	
AW_k (S. 329, Bd. I)	11814	23752	—	18775	—	
$AW_l = p\, AW_k$	35440	237520	—	56300	—	
$\frac{2 \cdot AW_l}{N i_a}$ (S. 255, Bd. II)	1,78	1,26	—	1,43	—	
Wendepol-Erregung. (S. 282 u. 283 Bd. II)						
B_{wmax}	6150	5600	3100	11900	9200	
B_{wm}	6200/3700	5370/8050	2800	9350	4170	
AW_{wl}	1580	2660	775	5175	3090	
AW_{wz}	10	10	5	65	20	
AW_a'	370	400	100	—	230	
AW_a''	170	250	75	—	55	
AW_{wm}	40	250	15	210	15	
AW_j'	1720	2340	480	4030	300	
AW_j''	1120	1660	360	175	70	
$AW_N = AW_{wl} + AW_{wz} + AW_a' - AW_a'' + AW_{wm} + AW_j' - AW_j''$ (S. 282, Bd. II) .	2430	3750	940	9305	3530	
τAS	5850	18860	3525	13100	20800	
AW_w	8280	22610	4465	22405	24330	
$\frac{2p\, AW_w}{N i_a}$	1,41	1,2	1,27	1,71	1,17	
Erregerwicklung.						
a) Hauptschlußwicklung. (S. 263, Bd. II.)						
Zahl der Spulen	6	—	—	—	—	
Schaltung der Spulen	2×3 in Serie	—	—	—	—	
Windungen pro Spule	5,5	—	—	—	—	
Windungen total $\frac{AW_l}{J} = w_h$	16,5	—	—	—	—	
Stromdichte s_h	2	—	—	—	—	$\frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$

[1]) Experimentell ermittelt. Die Bürsten sind aus der Wendepolmitte in der Drehrichtung etwas verschoben.

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Drahtquerschnitt $q_A = \frac{J_A}{s_A}$	85	—	—	—	—	mm²
Drahtdimensionen nackt und isoliert	8,5×10	—	—	—	—	mm
Radiale Höhe des Wicklungsraumes	—	—	—	—	—	cm
Breite des Wicklungsraumes	—	—	—	—	—	„
Mittlere Länge einer Windung l_h	92	—	—	—	—	„
Widerstand $R_h = \frac{(1+0{,}004\,T_m)\,w_h\,l_h}{5700\,q_h}$ (S. 667, Bd. I)	0,0019	—	—	—	—	Ω
Anlaßwiderstand (Motor) r_A	—	—	—	—	—	Ω
Maximale Stromstärke beim Anlassen $\frac{P}{R_a + R_h + R_c + r_A}$	—	—	—	—	—	Amp.
b) Nebenschlußwicklung. (S. 260, Bd. II.)						
Erregerspannung	220	630	115	293—342	—	Volt
Zahl der Spulen	6	20	4	6	—	
Schaltung der Spulen	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	
Windungen pro Spule	1000	780	1150	2610	216	
Mittlere Länge einer Windung l_n	92	130	63	100	350	cm
$q_n = \frac{(1+0{,}004\,T_m)\,A\,W_r\,l_n}{5700 \cdot P} \cdot 1{,}1$ bis $1{,}2$	4,15	13,8	3,14	2,55	8,5	mm²
bei Doppelschlußmaschinen, wo eine Nebenschlußregulierung im weiteren Umfang nicht verlangt wird						
$q_n = \frac{(1+0{,}004\,T_m)\,A\,W_{ro}\,l_n}{5700 \cdot P} \cdot 1{,}0$ bis $1{,}1$	—	—	—	—	—	„
Durchmesser nackt und isoliert	2,3/2,6	4,2/4,7	2,0/2,4	1,8/2,2	3,3/3,8	mm
Stromdichte bei Vollast s_n	—	1,16	—	1,41	—	$\frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$
i_n bei Vollast $= q_n\,s_n$	—	15,3	—	—	—	Amp.
Totale Windungszahl $w_n = \frac{A\,W_r}{i_n}$	6000	15600	—	15660	432	
i_n bei Leerlauf $= \frac{A\,W_{ro}}{w_n}$	5,28	12,7	—	—	—	Amp.
$i_{n\,min} = 0{,}8$ bis $0{,}9\,i_n$	—	—	—	—	—	„
Widerstand $R_n = \frac{(1+0{,}004\,T_m)\,w_n\,l_n}{5700 \cdot q_n}$ (S. 666, Bd. I)	27,7	26	—	107,5	—	Ω
$i_{n\,max} = \frac{P}{R_n}$	—	—	—	—	—	Amp.
Regulierwiderstand $r_n = \frac{P}{i_{n\,min}} - R_n$	—	—	—	—	—	Ω
Radiale Höhe des Wicklungsraumes	13	18,5	14	18	9,5	cm
Breite des Wicklungsraumes	6	9,5	5	8	6,2	„

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
c) Wendepol- bezw. Kompensationswicklung. (S. 119, Bd. II)						
Zahl der Spulen	6	20	4	6	2	
Schaltung der Spulen	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	
Windungen pro Spule	11	7	4,5	10	22	
Windungen total w_c	66	140	20	60	44	
Stromdichte s_c	1,9	2,0	1,07	1,84	—	$\frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$
Leiterquerschnitt q_c	180	880	530	610	192,5	mm^2
Leiterdimensionen nackt	4×45	11×80	23×23	$4{,}2 \times 145$	$5{,}5 \times 35$	mm
Mittlere Länge einer Windung l_c	60	82	25	116	360	cm
Widerstand R_c	0,0046	0,23	0,0002	0,002	0,017	Ω
Radiale Höhe des Wicklungsraumes	5	8	16	145	—	cm
Breite des Wicklungsraumes	5,5	8	2,3	5	—	„
Verbindungskupfer	—	11×80	—	—	2 (2,5×40)	mm
Verluste und Wirkungsgrad.						
Eisenverluste:						
Periodenzahl $c = \frac{p\,n}{60}$	34	15,7	—	—	—	
Hysteresiskonstante σ_h (S. 638 u. 663 Bd. I)	1,5	1,5	—	—	—	
Wirbelstromkonstante σ_w (S. 641 u. 663, Bd. I)	10	10	—	—	—	
Eisenvolumen des Kernes V_a	12	34,2	—	—	—	dm^3
„ der Zähne V_z	5,15	75	—	—	—	„
Hysteresisverluste: $W_h = \sigma_h \frac{c}{100}\left[\left(\frac{B_a}{1000}\right)^{1,6} V_a + k_z \left(\frac{B_{z\,min}}{1000}\right)^{1,6} V_z\right]$ (S. 663, Bd. I)	730	6970	—	—	—	Watt
Wirbelstromverluste: $W_w = \sigma_w \left[\left(\frac{c}{100} \cdot \Delta \frac{B_a}{1000}\right)^2 V_a + k_z \left(\frac{c}{100} \Delta \frac{B_{z\,min}}{1000}\right)^2 V_z\right]$ (S. 663, Bd. I)	1300	5320	—	—	—	„
Totaler Eisenverlust $= W_h + W_w$ (S. 664, Bd. I)	2030	12290	—	—	—	„
Wirbelstromverlust in den Polschuhen pro dm^2 $W_p = C\,[(k_1 - 1)\,t_1\,B_1]^{2,2} \left(\frac{Z\,n}{60}\right)^{1,7} \cdot 10^{-11}$ (S. 649, Bd. I)	—	0,75	—	—	—	$\frac{\text{Watt}}{\text{dm}^2}$
Totaler Wirbelstromverlust in den Polschuhen $= 0{,}02\,p\,b_p\,l_p\,W_p$	—	1500	—	—	—	Watt

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Stromwärmeverluste:						
a) durch den Ankerstrom: (S. 665, Bd. I)						
Ankerwiderstand $R_a = \frac{N}{(2a)^2} \cdot \frac{l_a(1+0{,}004\,T_a)}{5700\,q_a}$	0,0134	0,011	—	—	—	Ω
Spannungsverlust im Anker $J_a R_a$	4,65	19,4	—	—	—	Volt
Wattverlust $W_{ka} = J_a^2 R_a$	1590	33600	—	—	—	Watt
b) durch den Erregerstrom: (S. 666, Bd. I)						
Hauptschlußwicklung $W_H = J_h^2 R_h$	220	—	—	—	—	,,
Nebenschlußwicklung $W_n = i_n^2 R_n$	970	7200	—	—	—	,,
Wendepolwicklung bezw. Kompensationswicklung $W_c = J_c^2 R_c$ . .	550	8300	—	—	—	,,
Kommutationsverluste: (S. 668, Bd. I)						
Mittlerer Spannungsverlust unter den Bürsten ΔP (S. 251, Bd. I)	—	—	—	—	—	Volt
Übergangsverlust unter den Bürsten $W_u = 2 \cdot J_a \Delta P f_u$	520	2650	—	—	—	Watt
Mechanische Verluste: (S. 676, Bd. I)						
Lagerreibung:						
für $v_z < 4$ m/sec: $W_R = 9{,}81 \frac{k_6}{T_z} d_z l_z \sqrt{v_z^3}$ (S. 676, Bd. I) .	1500	10000	—	—	—	Watt
für $v_z > 10$ m/sec: $W_R = 9{,}81 \frac{k_6'}{T_z} d_z l_z v_z$ (S. 676, Bd. I)	—	—	—	—	—	,,
Bürstenreibung: (S. 681, Bd. I)						
Auflagedruck pro cm² g	0,15	0,15	—	—	—	kg/cm²
Reibungskoeffizient ϱ	0,25	0,25	—	—	—	
Wattverlust $W_r = 9{,}81\, v_k F_b g \varrho$	535	2390	—	—	—	Watt
Luftreibung: W_L (S. 680, Bd. I)	—	—	—	—	—	,,
Summe aller Verluste.						
$W_v = W_h + W_w + W_{ka} + W_H + W_n + W_c + W_u + W_R + W_r + W_L$	8095	76430	—	—	—	,,
Wirkungsgrad: (S. 683, Bd. I)						
$\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$ bei Vollast .	90,3	93,5	—	—	—	%
,, $^3/_4$ Last .	—	93,5	—	—	—	%
,, $^1/_2$ Last .	—	92,6	—	—	—	%
,, $^1/_4$ Last .	—	87,4	—	—	—	%
Erwärmung.						
Kleinere Anker: (S. 742, Bd. I)						
Abkühlungsfläche $A_a = \pi D l_1 + \frac{\pi}{2} D^2$ . . .	—	—	—	—	—	cm²

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Spezifische Abkühlungsfläche: $a_a = \frac{A_a}{W_{ka} + W_h + W_w} \cdot (1 + 0{,}1\, v)$ . . .	—	—	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
Temperaturerhöhung $T_a = \frac{400 \text{ bis } 550}{a_a}$ ° C. .	—	—	—	—	—	°C
Größere Anker: (S. 742, Bd. I)						
Abkühlungsfläche $A_a = \pi\, Dl_1$	3470	30000	—	—	—	cm^2
Spezifische Abkühlungsfläche: $a_a = \frac{A_a}{W_{kz} + W_{hz} + W_{wz}} (1 + 0{,}1\, v)$ . . .	6,35	5,7	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
$W_{kz} = \frac{l_1}{l_a} W_{ka}$	640	10080	—	—	—	Watt
Temperaturerhöhung $T_a = \frac{250 \text{ bis } 450}{a_a}$ . . .	—	—	—	—	—	°C
Anker mit Stirnkappen und direkt auf der Welle sitzendem Armatureisen (Turbodynamos):						
$^*a_a = \frac{\pi\, D\, l_t + \pi\, D_m\, h\,(2 + n_s)}{W_{ka} + W_h + W_w} \cdot (1 + 0{,}1\, v_m)$	—	—	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
T_a	—	—	—	—	—	°C
Kommutator: (S. 747, Bd. I)						
Spezifische Abkühlungsfläche: $a_k = \frac{\pi\, D_k\, L_k}{W_u + W_r} (1 + 0{,}1\, v_k)$	3,85	5,55	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
Temperaturerhöhung $T_k = \frac{70 \text{ bis } 120}{a_k}$ . . .	43	22	—	—	—	°C
Magnetspulen: a) Hauptpole: (S. 739, Bd. I)						
Abkühlungsfläche A_m	12300	82600	—	—	—	cm^2
Spezifische Abkühlungsfläche $a_m = \frac{A_m}{W_H + W_n}$	10,4	11,5	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
Temperaturerhöhung $T_m = \frac{500 \text{ bis } 750}{a_m}$ . . .	—	—	—	—	—	°C
b) Wendepole:	7500	44000	—	—	—	
Abkühlungsfläche A_{mw}	12,3	5,3	—	—	—	cm^2
Spezifische Abkühlungsfläche $a_{mw} = \frac{A_{mw}}{W_c}$.	58	52	—	—	—	$\frac{cm^2}{Watt}$
Temperaturerhöhung $T_{mw} = \frac{500 \text{ bis } 750}{a_{mw}}$ . .	—	—	—	—	—	°C

$^*l_t$ = Totale Länge des Ankers inkl. Stirnkappen in cm.
D_m = Mittlerer Ankerdurchmesser = $D_i + h$ in cm.
$v_m = \frac{\pi D_m \cdot n}{60}$ in m/sec.

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
Kompensierte Maschinen:						
$a = \frac{\pi D_a' l_i + \frac{\pi}{4}(D_a'^2 - D_i'^2)(2+n_s)}{\text{Im Stator eingebettete Kupferverluste}}$	—	—	—	—	—	cm² Watt
Temperaturerhöhung: $T_m = \frac{200 \text{ bis } 300}{a_m}$ . .	—	—	—	—	—	°C
Nachprüfung der Maschine auf Kommutierung.						
Ankerkonstante $X = \frac{N}{K} l_i v A S \cdot 10^{-6}$ *) . . (S. 523, Bd. I)	0,176	0,34	0,253	2,32	2	
$S_k = \left(\frac{b_1}{\beta}\right) + \frac{p}{a}$ (S. 463, Bd. I)	5	4	1,5	3	2	
Reduzierte Bürstenbreite:						
$b_r = b_1 + \beta\left[1 - (1 + p_m)\frac{a}{p}\right]$ (S. 360, Bd. I)	15	23,3	10,35	20	12	mm
$C_N = \frac{\frac{u_k}{2} + \left(\frac{u_k}{u_n} - 1\right)\frac{b_r}{\beta} - \frac{u_k}{u_n}(1-\varepsilon)}{\frac{b_r}{\beta}}$ . . . (S. 277, Bd. II)	0,91	0,89	0,71	0	0	
Leitfähigkeiten. (S. 290, Bd. II.)						
$\lambda_n = 1{,}25\left(\frac{r}{3 r_3} + \frac{r_5}{r_5} + \frac{r_7}{r_8} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_6} + \frac{r_4}{r_1}\right)$.	3,63	3	2,14	4,4	2,2	
$\lambda_{nz} = 1{,}25\left(k_n \cdot \frac{r}{3 r_3} + \frac{r_5}{r_5} + \frac{r_7}{r_8} + \frac{2 r_6}{r_1 + r_6} + \frac{r_4}{r_1}\right)$	2,64	2,14	1,75	2	1,85	
$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi t_1}{2 r_1}$	0,53	0,61	0,57	0,735	0,54	
$\lambda_{kz} = 0{,}92 \log_{10} \frac{\pi (r - b_i)}{r_1}$	1,34	1,58	1,49	1,9	1,7	
$\lambda_s = 0{,}46 \log_{10} \frac{2 l_s}{U_s}$	0,8	0,8	0,8	0,46	0,77	
$C = \frac{A W_p}{b_i A S}$ (S. 462, Bd. I u. S. 291, Bd. II) . . .	0,5	0,5	0,5	—	—	
λ_q (S. 462, Bd. I u. S. 291, Bd. II)	3,5	2,5	2,5	3	—	
a) Maschinen ohne künstliche Kommutation:						
$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_i}{l_i}$ (S. 273, Bd. II) . . .	—	—	—	—	—	
$\lambda_{Kz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\lambda_s \frac{l_s}{l_i}$ (S. 290, Bd. II) . .	—	—	—	—	—	
$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \lambda_s \frac{l_s}{l_i}$ (S. 290, Bd. II)	—	—	—	—	—	

*) Nachfolgend wird die Ankerkonstante mit X bezeichnet.

Digitized by Google

	I	II	III	IV	V	
$\Delta e_o = 2\,S_k\,X\left(\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1+b_D-\frac{a}{p}\beta_D}+\lambda_{qo}\right)$ . . (S. 288, Bd. II)	—	—	—	—	—	Volt
$\Delta e_v = S_k\,X\left(\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1+b_D-\frac{a}{p}\beta_D}+\lambda_{qv}\right)$ . . . (S. 288, Bd. II)	—	—	—	—	—	Volt
$e_{rs} = 2\,X\,\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1+b_D-\left(\frac{a}{p}-\varepsilon\right)\beta_D}$ (S. 273, Bd. II)	—	—	—	—	—	Volt
$e_{r\,max} = e_{rs}\frac{\lambda_{Ns}+C_N\lambda_{Nz}}{\lambda_{Ns}}$ (S. 277, Bd. II) . . .	—	—	—	—	—	Volt
$e_z = (1+p_w)\frac{\beta}{b_r}\,X\,\lambda_{Lz}$ (S. 288, Bd. II)	—	—	—	—	—	Volt
b) Maschinen mit künstlicher Kommutation:						
ΔB_{wl} (S. 584, Bd. I)	645	1550	725	—	35	
$\Delta e_w = S_k\frac{N}{K}\,l_{wl}\,v(\Delta B_{wl})10-6$ (S. 292, Bd. II)	1,8	4,2	1,6	—	0,53	Volt
$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\frac{l_z}{l_i}\,\lambda_z$	4,78	4,58	3,73	5,47	3,46	
$\lambda_{Nz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + 0{,}5\,\frac{l_z}{l_i}\,\lambda_z + (k_w-1)\,\lambda_{kz}\,\frac{l_w}{l_i}$ [1] (S. 285, Bd. II)	4,8	4,93	4,48	4,73	5,2	
$\lambda_{Lz} = \lambda_{nz} + \lambda_{kz} + \frac{l_z}{l_i}\,\lambda_z + (k_w-1)\,\lambda_{kz}\,\frac{l_w}{l_i}$ [1] (S. 292, Bd. II) .	5,42	5,90	5,50	5,31	5,95	
$e_{rs} = 2\,X\,\frac{t_1\,\lambda_{Ns}}{t_1+b_D-\left(\frac{a}{p}-\varepsilon\right)\beta_D}$ (S. 273, Bd. II)	0,43	0,88	0,67	5,45	6,54	Volt
$e_{r\,max} = e_{rs}\frac{\lambda_{Ns}+C_N\lambda_{Nz}}{\lambda_{Ns}}$ (S. 277, Bd. II) . . .	0,82	1,73	1,24	5,45	6,54	Volt
$e_z = (1+p_w)\frac{\beta}{b_r}\,X\,\lambda_{Lz}$ (S. 292, Bd. II)	0,25	0,54	0,76	3,7	—	Volt
$S = 0{,}5\left(\frac{N}{K}\right)^2 l_i k_d \cdot \lambda_{Lz}\,10^{-8}$ (S. 398, Bd. I) . .	—	—	—	—	445	Henry
$A = \frac{R_{wT}}{100\cdot v_k\,l_B\,S}$ (S. 585, Bd. I)	—	—	—	—	4,6	
Gewichte.						
Ankerkupfer	46	760	24	192	130	kg
Magnetkupfer	227	2500	80	355	115	„
Wendepol- bezw. Kompensationskupfer . .	64	900	24	380	270	„
Ankereisen	170	3600	95	775	425	„
Magnete und Polschuhe	340	4180	120	430	980	„
Joch	660	7400	225	420		„

[1]) Bei p Wendepolen siehe Gl. 100b S. 285 bezw. 119 S. 292.

Digitized by Google

79. Tabelle VII. Hauptabmessungen und

Lauf. Nr.	Fig. oder Tafel	Beschreib. auf Seite d. Buches	Firma	Maschinenart	Leistung PS	Leistung KW	Tourenzahl n	$\frac{PS}{n}$ bezw. $\frac{KW}{n}$	Klemmenspannung P
1	255 u. 256	147	Vereinigte El. Act.-Ges. Wien	Nebenschlußmotor	2,6	—	2550	0,00010	160
2	259 u. 260	152	Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußmotor	12	—	2600	0,0046	450
3	257 u. 258	149	Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußmotor	8	—	750	0,0107	240
4			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Nebenschlußmotor	30	—	1200	0,025	220
5	263 u. 264	154	Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußmotor	125	—	430	0,29	220
6			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Nebenschlußmotor	(100) 240	—	500	0,48	600
7	282 u. 283	174	Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Fördermotor	280	—	(0)—30	9,33	(0)—220
8			Siemens-Schuckert-Werke	Zusatzmaschine	—	5	1160	0,0043	(0)—50
9			Siemens-Schuckert-Werke	Nebenschlußdynamo	—	6,4	1300	0,0049	110
10			Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußdynamo	—	6	1100	0,00545	150
11			Vereinigte El.-Act.-Ges. Wien	Nebenschlußdynamo	—	10,5	1200	0,00875	230
12	261 u. 262	152	Ges. f. Elektr. Industrie, Karlsruhe	Nebenschlußdynamo	—	50	725	0,069	220
13			Spezialfabrik elektr. Maschinen vorm. A. Ebert	Nebenschlußdynamo	—	72	550	0,131	120
14	265 u. 266	156	Siemens-Schuckert-Werke	Nebenschlußdynamo	—	150	500	0,3	220
15			Vereinigte El.-Act.-Ges. Wien	Nebenschlußdynamo	—	175	450	0,39	230
16			Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußdynamo	—	100	250	0,4	240
17	269 u. 270	159	Ganz'sche El.-Akt.-Ges.	Nebenschlußdynamo	—	107,5	225	0,48	500
18			Elektrizitäts-Ges. Alioth	Nebenschlußdynamo	—	246	375	0,655	110
19	272 u. 273	162	Ges. f. Elektr. Industrie, Karlsruhe	Nebenschlußdynamo	—	350	500	0,7	260
20			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Dynamo mit Fremderregung	—	220	300	0,73	(0)—220
21	Tafel I	164	Maschinenfabrik Oerlikon	Nebenschlußdynamo	—	560	333	1,68	160
22			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Nebenschlußdynamo	—	350	200	1,75	2×130 bis 160
23	274 u. 275	165	Comp. Gén. Electrique, Nancy	Nebenschlußdynamo	—	210	120	1,75	260 350
24			Maschinenfabrik Oerlikon	Nebenschlußdynamo	—	250	125	2,0	500
25	276 u. 277	167	Maschinenfabrik Oerlikon	Nebenschlußdynamo	—	600	276	2,16	560
26	278 u. 279	169	Elektr.-Akt.-Ges. vm. Kolben & Co.	Nebenschlußdynamo	—	275	125	2,2	62,5
27	Tafel II	171	Ges. f. Elektr. Industrie, Karlsruhe	Nebenschlußdynamo	—	270	100	2,7	115
28			Sachsenwerk, Licht u. Kraft-A.-G.	Nebenschlußdynamo	—	350	120	2,92	2×110
29			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Nebenschlußdynamo	—	360	120	3,0	500
30	280 u. 281	172	Comp. Gén. Electrique, Nancy	Nebenschlußdynamo	—	400	125	3,2	240
31			Ateliers de Constr. El. de Charleroi	Nebenschlußdynamo	--	400	110	3,63	480
32	Tafel III	174	Elektrizitäts-Ges. Alioth	Nebenschlußdynamo	—	900	100	9,0	500 (600)

Digitized by Google

berechnete Größen ausgeführter Maschinen.

Stromstärke J	Polpaarzahl p	Halbe Zahl der Ankerzweige a	Stromstärke pro Ankerzweig i_a	Ankerdurchmesser D	D_1	Eisenhöhe h	Eisenlänge l_1	l	Zahl der Luftschlitze n_s	Umfangsgeschwindigk. v	Stabzahl N	Nutenzahl Z	Lamellenzahl K	Windungen pro Spule $\frac{N}{2K}$	Wicklungsart	Laut. Nr.
15,5	2	1	7,7	18,9	9,5	2,4	6,3	6,3	—	25,2	744	31	93	4	Reihenwicklung	1
24,5	2	1	12	25,5	10,5	5,3	15,5	14,3	1	34,7	702	39	117	3	Reihenwicklung	2
30,5	2	1	15	25,5	10	5,05	15,5	14,3	1	10,0	702	39	117	3	Reihenwicklung	3
114	2	1	56	30	6,8	9,6	19	18	1	18,8	262	66	131	1	Reihenwicklung	4
460	3	3	77	59,1	33,5	9,9	32	31	1	13,3	546	91	273	1	Parallelwicklung	5
(150)—320	3	1	160	69	40	11,4	32	30	2	18	346	173	173	1	Reihenwicklung	6
(2000)—1000	8	2	250	250	210	13,7	50	46,25	3	3,92	756	189	378	1	Reihenparallelwickl.	7
100	2	2	25	20	9	3,6	12	11	1	12,1	276	46	138	1	Parallelwicklung	8
58	2	1	29	21	9	4,0	14	13	1	14,3	258	43	129	1	Reihenwicklung	9
40	2	1	20	23,2	8	4,6	12,5	11,3	1	13,4	594	33	99	3	Reihenwicklung	10
45,8	2	1	22,9	27	12	5,2	10,9	10,9	—	17	540	45	135	2	Reihenwicklung	11
227	2	1	115	43	17	9,8	22	20	2	16,3	266	67	133	1	Reihenwicklung	12
600	3	3	100	56	32	8,3	20	19	1	16,1	432	72	216	1	Reihenparallelwickl.	13
682	3	3	115	66	38,5	10,3	31	25	4	17,3	420	70	210	1	Parallelwicklung	14
766	3	3	128	75	37	15,5	28,4	26	2	17,6	456	114	228	1	Parallelwicklung	15
416	3	1	210	72	49,5	8,2	34,6	33,8	1	9,4	352	88	176	1	Reihenwicklung	16
215	4	1	110	88	58,5	10,9	26	22	4	10,4	639	63	315	1	Reihenwicklung	17
2240	4	2×4	140	95	65	11,5	27,5	25,5	2	18,6	2×320	160	2×160	1	Parallelwicklung	18
1350	4	4	170	105	52	23,3	31,5	28,5	3	27,5	360	90	180	1	Parallelwicklung	19
(2000)—1000	4	4	125	110	75	14,5	34	31	3	17,3	512	128	256	1	Parallelwicklung	20
3500	6	12	146	150	112	14,8	40	37,5	2	26,2	816	204	408	1	Zweifache Parallelwickl.	21
1350	6	2×4	170	160	123	14,5	30	27	3	16,8	2×380	190	2×190	1	Reihenparallelwickl.	22
800—(600)	5	5	80	150	115	13,5	33,8	31,8	2	9,45	1560	195	390	2	Parallelwicklung	23
500	6	6	41,5	175	139	14,5	40	37,5	2	11,4	2520	210	630	2	Parallelwicklung	24
1070	5	5	108	150	112	15,1	40	37,5	2	21,7	1120	280	560	1	Parallelwicklung	25
4400	8	2×8	138	175	138	16,5	32	29,6	2	11,4	2×544	272	2×272	1	Parallelwicklung	26
2390	8	8	150	195	155	16,5	31	28	3	10,2	960	240	480	1	Parallelwicklung	27
1590	8	8	100	225	192	12,9	25	23	2	14,1	1728	288	864	1	Reihenparallelwickl.	28
720	6	3	120	178	135	17,8	33	30	3	11,2	1302	217	651	1	Reihenparallelwickl.	29
1670	5	5	168	183	145	14,6	35	32	3	12	1230	205	615	1	Reihenparallelwickl.	30
850	5	5	86	200	140	25,6	45	40,2	4	11,5	1440	240	720	1	Parallelwicklung	31
1800—(1500)	7	7	129	300	230	31,4	39	35	4	15,7	2100	350	1050	1	Parallelwicklung	32

Digitized by Google

Laufende Nr.	Leistung PS bezw. KW	Tourenzahl	Leiterdimensionen nackt mm	Leiterdimensionen isoliert mm	Leiterquerschnitt	Stromdichte	Ankerwiderstand	Ohmscher Spannungsabfall	Leiter pro Nut	Nutendimensionen Breite	Nutendimensionen Tiefe	Kommutator Durchmesser	Kommutator Nutzbare Länge	Kommutator Lamellenteilung	Kommutator Umfangsgeschwindigkeit	max. Spannung zwischen benachbarten Lamellen
		n			q_a	s_a	R_a	$J_a R_a$	z	r_3	h_n	D_k	L_k	β	v_k	$P_{z\,a}$
1	PS 2,6	2550	1,8 Φ	2,3 Φ	2,55	3	0,41	6,3	24	8,5	23	12,4	3,5	4,2	16,6	10,8
2	12	2600	2,7 Φ	3,05 Φ	5,7	2,1	0,29	7	18	11,5	24	15,5	5,1	4,15	21,1	24,1
3	8	750	2,6 Φ	3,1 Φ	5,3	2,82	0,31	9	18	11,5	27	17,5	7,5	4,65	6,9	12,9
4	30	1200	1,8×6	2,6×6,8	10,8	5,2	0,07	7,85	4	8	19,7	22	11	5,3	13,8	10,5
5	125	430	1,8×12	—	21,6	3,56	0,0117	5,4	6	10	29	42	17,5	4,83	9,45	2,53
6	(100) 240	500	2,4×12	—	28,8	5,55	0,055	17,6	2	6,2	31,2	50	20	9,1	13,1	32,6
7	280	(0)–30	8×25	—	200	1,25	0,0059	5,9	4	21	63	150	21	12,4	2,35	14,6
8	KW 5	1160	1,2×7,5	—	9	2,78	0,016	1,6	6	6,5	19	18	10	4,1	10,9	2,27
9	6,4	1300	1,4×8	—	11,2	2,6	0,05	2,9	6	7,1	20	18	10	4,4	12,2	5,35
10	6	1100	2,8 Φ	3,4 Φ	6,15	3,25	0,215	8,6	18	12	30	15,5	5,1	4,9	8,9	9,5
11	10,5	1200	2,7 Φ	3,2 Φ	5,7	4,05	0,18	8,3	12	8,5	23	18,5	7	4,3	11,6	10,7
12	50	725	2,5×12	—	30	3,85	0,034	7,75	4	8,5	32	26	18	6,15	9,9	10,4
13	72	550	2,2×15	3,7×16,5	33	3	0,0048	2,9	6	10,5	37	38	20	5,5	10,9	5,25
14	150	500	3,2×13	—	41,6	2,76	0,005	3,4	6	12,6	35	56	31	8,4	14,7	9,9
15	175	450	3×13	—	39	3,28	0,007	5,35	4	9,5	35	50	34	6,9	11,7	6,9
16	100	250	6×12,5	—	75	2,8	0,023	9,6	4	15	31	47	14,5	8,4	6,15	12,9
17	107,5	225	2,8×14	3,7×15	39,2	2,8	0,0582	12,8	10	20,5	39	54	8	5,4	6,35	19,9
18	246	375	2,5×14	4,1×15,6	35	4	0,00125	2,8	4	10	35	60	2×33,5	11,8	11,8	0,6
19	350	500	2(2,5×11)	6,5×12	54	3,15	0,00205	2,75	4	14	32	48	42	8,35	12,6	18,1
20	220	300	3,5×12	4,2×12,7	42	3	0,0014	4	4	11	30	70	45	8,6	11	10,8
21	560	333	3×17	4×18	51	2,87	0,00058	2	4	12	42	90	60	6,9	15,7	14,8
22	350	200	3,7×16	—	59	2,88	0,002	2,7	4	11	40	90	2×35	14,8	9,4	17,2
23	210	120	1,8×16	—	28,8	2,78	0,012	9,6	8	12,5	40	105	19	8,45	6,6	10,4
24	250	125	1×13	1,5×13,5	13	3,2	0,03	15	12	14	35	120	17,8	6	7,85	14,9
25	600	276	2,5×16	3,5×17	40	2,7	0,0064	6,85	4	8,5	39	104	32	5,85	15	15,7
26	275	125	3,5×18	4,5×19	63	2,2	0,0003	1,32	4	10	45	85	2×26,5	9,8	5,55	5,75
27	270	100	4×14	—	56	2,68	0,00125	3	4	11,5	35	130	35	8,5	6,8	6
28	350	120	2,3×14	—	32,2	3,1	0,0004	6,4	4	11,5	36	160	23	5,8	10	6,4
29	360	120	2,5×15	3,1×15,6	37,5	3,2	0,02	14,4	6	11,5	37	140	20	6,75	8,8	14,4
30	400	125	3,6×18,5	—	66,5	2,52	0,0045	7,5	6	15	44	131	30	6,7	8,6	6,15
31	400	110	2,4×15	—	36	2,4	0,0115	9,8	6	13	44	150	25	6,55	8,65	10,5
32	900	100	2,5×14	3,5×15	35	3,7	0,0088	15,9	6	13,6	36	200	37	6	10,5	10,5

Digitized by Google

Material	Bürsten: Anzahl der Stifte	Bürsten: Stifte pro Bürste	Bürsten: Bürstenbreite	Bürsten: Länge einer Bürste	Bürsten: Strombelastung	Luftraum	Polteilung	Magnetkern: ideeller Polbogen	Magnetkern: ideeller Polbogen Polteilung	Magnetkern: Länge des Polschuhes	Magnetkern: Länge axial	Magnetkern: Breite bezw. Durchmesser	Magnetkern: Querschnitt	Magnetkern: Rad. Höhe inkl. Polschuh	Jochquerschnitt	Induzierte Spannung bei Vollast	Kraftfluß bei Vollast	Streuungskoeffizient (geschätzt)	Kraftfluß im Magnetkern	Laufende Nr.
	p_1		b_1		s_a	δ	τ	b_i	a_i	l_p			Q_m		Q_j	E_a	Φ_δ	σ	Φ_m	
Kohle	4	1	1,2	2,5	2,57	0,3	14,8	10,5	0,71	5,5	5,5	5,3	27,6	6,6	32	152	$0{,}24 \cdot 10^6$	1,2	$0{,}29 \cdot 10^6$	1
Kohle	4	2	0,6	2,2	4,55	0,35	20	16	0,8	15,5	—	11,5	102	10,9	80	441,5	$0{,}73 \cdot 10^6$	1,2	$0{,}87 \cdot 10^6$	2
Kohle	2	2	0,9	2,5	6,8	0,35	20	16	0,8	15,5	—	12,2	117	10,9	89	229	$1{,}3 \cdot 10^6$	1,19	$1{,}55 \cdot 10^6$	3
Kohle	4	3	1,0	3,0	6,3	0,4	23,5	18	0,765	18	—	15	177	13,5	92	210,5	$2 \cdot 10^6$	1,2	$2{,}4 \cdot 10^6$	4
Kohle	6	5	1,2	3,0	8,5	0,35	31	24	0,775	32	—	23	415	20	230	213	$5{,}45 \cdot 10^6$	1,19	$6{,}5 \cdot 10^6$	5
Kohle	6	4	1,5	4,0	4,45	0,5	36,1	26	0,72	30	32	19,5	550	19,5	260	581	$6{,}7 \cdot 10^6$	1,18	$7{,}9 \cdot 10^6$	6
Kohle	16	4	2	4	3,9	0,6	49	32	0,655	50	27,5	46	1260	33	780	212,5	$14{,}1 \cdot 10^6$	1,17	$1{,}65 \cdot 10^6$	7
Kohle	4	6	1,0	1,3	6,4	0,3	15,7	12	0,765	11,8	11,8	6	67	8,8	85	53	$0{,}99 \cdot 10^6$	1,2	$1{,}19 \cdot 10^6$	8
Kohle	4	2	1,5	1,8	5,38	0,4	16,5	12,5	0,755	13,5	13,5	6,5	83	9,4	105	114,5	$1{,}03 \cdot 10^6$	1,19	$1{,}23 \cdot 10^6$	9
Kohle	4	2	0,9	2,2	5,05	0,35	18,2	14	0,77	12,5	—	10	88,5	9,3	50	160	$0{,}74 \cdot 10^6$	1,19	$0{,}88 \cdot 10^6$	10
Kohle	4	2	1,2	2,5	3,8	0,2	21,2	16	0,755	10	10	9,5	90	9,3	42	240	$1{,}1 \cdot 10^6$	1,2	$1{,}32 \cdot 10^6$	11
Kohle	4	5	1,2	2,2	8,6	0,5	33,8	23	0,68	22	—	20,5	330	22	175	229,5	$3{,}57 \cdot 10^6$	1,16	$4{,}15 \cdot 10^6$	12
Kohle	6	7	1,8	2,4	6,6	0,6	29,3	22	0,75	20	—	18,4	266	17,4	150	124,5	$3{,}15 \cdot 10^6$	1,18	$3{,}7 \cdot 10^6$	13
Kohle	6	12	1,5	1,8	7,05	0,75	34,6	26	0,75	31	31	18	530	26	700	225	$6{,}44 \cdot 10^6$	1,2	$7{,}7 \cdot 10^6$	14
Kohle	6	7	1,8	4,5	4,55	0,6	39,2	30	0,765	27,5	—	25	490	21	300	237	$6{,}9 \cdot 10^6$	1,18	$8{,}15 \cdot 10^6$	15
Kohle	6	4	2,0	3,0	5,7	1,0	37,7	29,5	0,78	35	—	23,5	435	21	230	251	$5{,}7 \cdot 10^6$	1,19	$6{,}8 \cdot 10^6$	16
Kohle	8	2	1,6	3,75	4,5	0,35	34,6	26	0,75	25	25	20,5	490	20	200	514,5	$5{,}43 \cdot 10^6$	1,15	$6{,}23 \cdot 10^6$	17
Kohle	2×8	9	2,0	3,0	5,2	0,7	37,3	26,5	0,71	25	—	24	450	27	290	114	$5{,}7 \cdot 10^6$	1,15	$6{,}55 \cdot 10^6$	18
Kohle	8	12	1,6	3,0	5,9	0,5	41,2	28,5	0,69	31,5	—	28	615	28	400	265	$8{,}82 \cdot 10^6$	1,15	$10{,}15 \cdot 10^6$	19
Kohle	8	9	2,0	4,0	3,45	0,85	43,2	34	0,79	33	33	21,5	675	23,5	365	225,5	$8{,}8 \cdot 10^6$	1,18	$10{,}4 \cdot 10^6$	20
Kohle	12	19	1,8	3,0	5,7	0,8	39,3	26	0,66	38	38	15	540	20,7	575	163,5	$7{,}22 \cdot 10^6$	1,18	$8{,}55 \cdot 10^6$	21
Kohle	2×12	7	1,5	4,0	5,35	0,6	41,8	29	0,695	30	30	27	770	20,5	900	134	$7{,}06 \cdot 10^6$	1,16	$8{,}2 \cdot 10^6$	22
Kohle	10	5	1,37	3,0	7,8	0,7	47	33,5	0,715	33,8	—	31	755	24,5	390	271	$8{,}7 \cdot 10^6$	1,15	$10 \cdot 10^6$	23
Kohle	12	4	3,0	3,0	2,3	0,8	45,7	28	0,615	40	40	19	720	19	480	517	$9{,}85 \cdot 10^6$	1,18	$11{,}6 \cdot 10^6$	24
Kohle	10	10	1,0	3,0	7,15	1,2	47	32	0,68	39	39	21	740	28,5	420	568,5	$11 \cdot 10^6$	1,15	$12{,}7 \cdot 10^6$	25
Kohle	2×16	9	2,5	2,4	5,1	0,4	34,3	27	0,79	32	—	24,5	470	20	272	65	$5{,}72 \cdot 10^6$	1,18	$6{,}65 \cdot 10^6$	26
Kohle	16	10	1,6	3,0	6,25	0,6	38,2	27	0,705	31	—	26	530	28	660	119,5	$7{,}46 \cdot 10^6$	1,15	$8{,}6 \cdot 10^6$	27
Kohle	16	6	2,0	3,0	5,5	0,6	44,1	31	0,70	25	—	25	490	24	550	228	$6{,}6 \cdot 10^6$	1,15	$7{,}6 \cdot 10^6$	28
Kohle	12	4	1,5	4,0	5	0,8	46,5	36	0,775	31	—	31	750	32,2	900	516	$9{,}95 \cdot 10^6$	1,18	$11{,}7 \cdot 10^6$	29
Kohle	10	9	2,0	3,0	6,2	0,65	57,5	39	0,68	34,6	—	30	710	20,5	340	249	$9{,}7 \cdot 10^6$	1,15	$11{,}1 \cdot 10^6$	30
Kohle	10	5	2,0	4,0	4,25	0,85	62,8	47	0,75	45	—	42	1390	40	1750	491,5	$18{,}6 \cdot 10^6$	1,15	$21{,}4 \cdot 10^6$	31
Kohle	14	10	1,6	3,0	5,35	1,1	67,2	48	0,715	37,8	—	40	1250	44,5	675	517,5	$14{,}8 \cdot 10^6$	1,15	$17 \cdot 10^6$	32

Digitized by Google

Laufende Nr.	PS bezw. KW	Tourenzahl	Induktionen bei Vollast: in der Luft	im Anker	in den Zähnen, ideell		im Magnetschenkel	im Joch	Material des: Polschuhes	Magnetkernes	Jochs	Hauptschlußwicklung: Windungen total	Drahtquerschnitt	Stromdichte
		n	B_l	B_a	$B_{z\,min}$	$B_{z\,max}$	B_m	B_j				w_h	q_h	s_h
	PS													
1	2,6	2550	3630	8850	7260	12800	10400	4500	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
2	12	2600	2980	5300	8000	13900	8500	5450	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
3	8	750	5370	10000	14300	27400	13200	9700	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	160	19,6	1,53
4	30	1200	5950	6400	15600	22300	13500	13000	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
5	125	430	7150	9900	16000	19800	15700	14100	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
6	(100)/240	500	8230	10900	19000	23000	14400	15200	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
7	280	(0)–30	9100	12400	21400	23900	13100	10600	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
8	KW 5	1160	7040	13800	15800	24800	17800	7000	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
9	6,4	1300	6000	11000	13100	20400	14800	5850	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
10	6	1100	4340	7850	11300	25800	9900	8000	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
11	10,5	1200	6300	10800	12800	18600	14600	15700	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
12	50	725	7300	10100	15000	20000	12600	11800	Eisenblech	Schmiedeisen	Stahlguß	—	—	—
13	72	550	7260	11100	14600	19000	13900	12300	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
14	150	500	8550	13900	19100	23500	14500	5500	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
15	175	450	8340	9500	18200	22000	16600	13600	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
16	100	250	5600	11400	15400	19500	15600	14800	Stahlguß	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
17	107,5	225	8450	12600	19900	21800	12700	15500	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
18	246	375	8000	10800	20200	24100	14500	11300	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
19	350	500	10200	7400	19600	21700	16500	11300	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
20	220	300	7850	10900	15700	17700	15400	14200	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
21	560	333	7100	7200	17200	19300	15800	7450	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
22	350	200	8400	11600	17200	18400	10700	4550	Eisenblech	Eisenblech	Gußeisen	—	—	—
23	210	120	7850	11200	18800	21400	13200	12800	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
24	250	125	9000	10100	22400	24600	16100	12100	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
25	600	276	8800	10800	20600	22800	17200	15100	Eisenblech	Eisenblech	Stahlguß	—	—	—
26	275	125	6800	6500	15800	17700	14100	12200	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
27	270	100	9200	9000	20000	21400	16200	6500	Eisenblech	Schmiedeisen	Gußeisen	—	—	—
28	350	120	8750	12300	19300	20600	15500	6900	Eisenblech	Stahlguß	Gußeisen	—	—	—
29	360	120	8650	10300	19000	20500	15600	6500	Eisenblech	Stahlguß	Gußeisen	—	—	—
30	400	125	7500	11500	18700	20800	15600	16300	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—
31	400	110	9100	10000	21700	23800	15400	6100	Eisenblech	Stahlguß	Gußeisen	—	—	—
32	900	100	8200	7500	19800	21000	13600	12600	Eisenblech	Stahlguß	Stahlguß	—	—	—

Digitized by Google

Nebenschluß-wicklung: Windungen total w_n	Schaltung	Drahtdimensionen	Drahtquerschnitt q_n	Charakteristische Größen: $\frac{D^2 l_i n}{KW}$	AS	$\frac{N}{K} l_i v AS 10^{-6}$	$AW_1 + AW_2$	$\frac{l_i}{l_k} AS$	λ_{Ns}	λ_{Ls}	λ_q	max. Anzahl Spulen zwischen d. Bürstenkanten S_k	Kurzschluß-Spannung Ae_0	Ae_r	Effektive Reaktanzspannung e_s	Bemerkungen	Laufende Nr.
12000	Serie	0,60,85	0,28	$230 \cdot 10^4$	96,5	0,122	2,23	3,81	5,61	4,3	6	—	4,7	0,2			1
24000	Serie	0,5/0,7	0,168	$232 \cdot 10^4$	105	0,33	1,32	2,55	3,69	7	4	—	12,1	0,63			2
20000		0,4/0,6															
9600	Serie	1,0/1,3	0,78	$101 \cdot 10^4$	131	0,119	2,4	2,77	3,91	7	4	—	4,2	0,48			3
8760	Serie	1,3/1,6	1,32	$80,5 \cdot 10^4$	155	0,109	1,85	2,91	3,98	7	4	—	3,8	0,18			4
9000	Serie	1,8/2,2	2,55	$47,5 \cdot 10^4$	226	0,19	1,0	2,83	3,59	7	3	—	5,1	0,28			5
10170	Serie	1,8/2,1	2,55	$39 \cdot 10^4$	255	0,288	1,43	4,38	5,28	5	6	—	11,9	0,77	240 PS bei plötzlichen Stößen		6
5136	Serie	6,0/6,5	28,2	$41,5 \cdot 10^4$	240	0,092	2,45	2,93	3,78	3	8	7	—	0,15	Erregung: 110 Volt		7
3760	Serie	1,4 Φ	1,54	$103 \cdot 10^4$	110	0,031	3,8	3,16	4,14	4,5	3	—	0,6	0,05			8
5440	Serie	1,35 Φ	1,44	$123 \cdot 10^4$	114	0,0445	3,3	3,1	4,04	4,5	6	—	1,6	0,05			9
5240	Serie	1,1/1,4	0,95	$112 \cdot 10^4$	163	0,159	1,83	2,98	4,15	5,5	4	—	4,9	0,28			10
9000	Serie	0,8/1,1	0,53	$91 \cdot 10^4$	146	0,108	1,18	3,37	4,72	4,5	6	—	4,2	0,15			11
8800	Serie	1,6 Φ	2,02	$59 \cdot 10^4$	226	0,157	1,36	3,88	5,08	3	4	—	3,3	0,33			12
4560	Serie	2,8 Φ	6,16	$47 \cdot 10^4$	245	0,155	1,54	3,63	4,55	5,7	4	—	4,8	0,22			13
4800	Serie	3,1 Φ	7,5	$42 \cdot 10^4$	231	0,232	2,4	3,04	3,95	4,5	2	—	3,2	0,52			14
6960	Serie	2,6/3,1	5,3	$40 \cdot 10^4$	248	0,24	1,42	3,67	4,71	5,7	3	—	5,6	0,44			15
7200	Serie	2,8/3,3	6,15	$45 \cdot 10^4$	327	0,213	1,14	2,30	3,32	7	9	—	15,6	0,23			16
	Serie	1,8/2,0	2,55	$40 \cdot 10^4$	250	0,128	1,3	2,41	3,22	4,5	12	—	9,3	0,11			17
2336	Serie	4,8/5,3	18,1	$37 \cdot 10^4$	300	0,30	1,56	3,39	4,56	5,6	2	—	4,6	0,81	Mit 2 Kommutat.		18
8000	Serie	2,9/3,3	6,6	$48 \cdot 10^4$	185	0,31	2,25	2,62	3,77	3	2	—	3,2	0,61			19
2360	Serie	5,0/5,5	19,7	$54,5 \cdot 10^4$	185	0,21	1,92	3,04	4,07	4,6	3	—	4,1	0,37	Erregung: 110 Volt		20
4200	Serie	5,5/6,0	23,8	$52,5 \cdot 10^4$	253	0,52	2	3,20	4,14	5,5	1,5	—	6,2	1,33			21
2940	Serie	5,5/6,0	23,8	$42,5 \cdot 10^4$	257	0,25	1,33	3,59	4,71	4,5	3	—	6,0	0,96	Mit 2 Kommutat.		22
7000	Serie	4,4 Φ	15,2	$42,5 \cdot 10^4$	265	0,332	1,38	3,23	4,45	5,6	3	—	8	0,91			23
9000	Serie	3/3,4 Φ	7,1	$60 \cdot 10^4$	190	0,34	3,5	2,69	4,01	4,2	5	—	9,1	0,27			24
12700	Serie	3,6/4,0	10,1	$40,5 \cdot 10^4$	256	0,435	2,67	3,87	4,88	4,3	2	—	6,2	1,24			25
2288	Serie	6/6,6 □	36	$43,5 \cdot 10^4$	273	0,196	0,79	3,89	4,56	7	3	—	5	0,35	Mit 2 Kommutat.		26
4080	Serie	6,5/7,0	33,2	$42,5 \cdot 10^4$	235	0,144	1,95	3,11	4,21	3	2	—	1,5	0,32			27
6800	Serie	4,4/4,8	15,2	$43 \cdot 10^4$	244	0,167	1,5	3,48	5,0	4,3	4	—	4,2	0,24			28
15360	Serie	3,0/3,5	7,05	$33,8 \cdot 10^4$	280	0,20	1,38	3,27	4,37	3,3	6	—	6,5	0,32			29
5200	Serie	4,6	16,6	$35 \cdot 10^4$	360	0,288	0,78	3,18	4,64	4,3	3	—	5,4	0,45			30
10500	Serie	3,7/4,0	10,7	$47,5 \cdot 10^4$	197	0,195	2,25	3,58	4,88	4,5	3	—	3,9	0,31			31
13232	Serie	4,8/5,3	18,1	$37,7 \cdot 10^4$	288	0,34	1,3	3,15	4,76	5,6	3	—	7,8	0,61			32

Digitized by Google

Achtzehntes Kapitel.

80. Anlauf eines Motors. — 81. Anlaufzeit, Anlaufstromstärke und Anlaufverlust. — 82. Stufung der Anlaßwiderstände. — 83. Gang der Berechnung eines Anlaßwiderstandes. — 84. Berechnung der Bremswiderstände.

80. Anlauf eines Motors.

Wird ein Leiter von der Länge l_i von einem Strom i_a Amp. durchflossen und befindet er sich in einem Felde, dessen Stärke B_l auf der ganzen Länge des Leiters konstant ist, so wirkt auf den Leiter, wenn das Feld senkrecht auf der Leiter- und der Bewegungsrichtung steht, eine Kraft

$$i_a l_i B_l \frac{10^{-6}}{9{,}81} \text{ kg}.$$

Bei einem Motor haben wir N von einem Strom von i_a Amp. durchflossene Leiter, jedoch ist die Umfangskraft hier nicht N-mal so groß, weil nicht alle Leiter in demselben Feld B_l liegen. Wir können uns vorstellen, daß die Luftinduktion über dem Teil $\alpha_i \pi D$ des Ankerumfanges konstant und gleich B_l ist, während sie über dem Teil $(1 - \alpha_i)\pi D$ gleich Null ist. Wir erhalten dann die Umfangskraft

$$K = i_a l_i B_l N \alpha_i \frac{10^{-6}}{9{,}81} \text{ kg}$$

und das auf den Anker ausgeübte Drehmoment

$$\vartheta_a = K \frac{D}{2} = i_a l_i B_l N \alpha_i \frac{D}{2} \frac{10^{-8}}{9{,}81} \text{ kgm}.$$

Setzen wir in dieser Gleichung

$$i_a = \frac{J_a}{2a}, \quad \pi D = 2p\tau \quad \text{und} \quad \alpha_i \tau l_i B_l = \Phi,$$

so erhalten wir das auf den Anker ausgeübte Drehmoment

$$\vartheta_a = \frac{10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81} \frac{p}{a} N \Phi J_a \text{ kgm} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (150)$$

Digitized by Google

Wir wollen zunächst den Anlauf eines leerangehenden Nebenschlußmotors betrachten, da sich hier die maßgebenden Faktoren am einfachsten übersehen lassen.

Zum Übergang vom Ruhezustand in Bewegung braucht der Motor ein bestimmtes Anzugsmoment ϑ_A, um das Reibungsmoment ϑ_R zu überwinden. Geschieht dies bei einem Strom J_A, so muß sein

$$\vartheta_A = \left(\frac{10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 9{,}81} \frac{p}{a} N \Phi\right) J_A > \vartheta_R \text{ kgm}$$

oder

$$J_A > \frac{2 \pi \cdot 9{,}81 \cdot 10^8}{N \Phi} \frac{a}{p} \vartheta_R \text{ Amp.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (151)$$

Da für das Reibungsmoment die Reibung der Ruhe in Betracht kommt, kann die notwendige Antriebsstromstärke ziemlich groß werden.

Sobald sich der Anker in Bewegung gesetzt hat, muß ein bestimmter Anlaufeffekt geleistet werden. Dieser setzt sich zusammen aus der Leistung, welche der Motor zur Erhaltung der jeweiligen Geschwindigkeit notwendig hat, und einer zusätzlichen Leistung, welche zur Beschleunigung dient und in lebendige Kraft der bewegten Massen übergeführt wird.

Der erste Teil ist bei dem betrachteten Fall eines leer anlaufenden Nebenschlußmotors der Leerlaufeffekt, den dieser für die betreffende Tourenzahl verbraucht.

Der Leerlaufeffekt setzt sich zusammen aus der Stromwärme in der Ankerwicklung, den Reibungs-, Hysteresis- und Wirbelstromverlusten.

Der Stromwärmeverlust im Erregerkreis kommt hier nicht in Betracht, da letzterer vor dem Anlaßwiderstand abgezweigt wird.

Der Stromwärmeverlust in der Ankerwicklung ist gleich $J^2 R_g$, wenn R_g die Summe von Anker- und Übergangswiderstand darstellt.

Die übrigen Verluste ändern sich mit der Geschwindigkeit:

Hysteresisverlust . . . . . $= c_1 v$
Reibungsverlust . . . . . $= c_2 v^{1,5}$
Wirbelstromverlust . . . . . $= c_3 v^2$.

Die Summe dieser drei Effekte werde mit W_L bezeichnet.

$$W_L = c_1 v + c_2 v^{1,5} + c_3 v^2 \text{ Watt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (152)$$

Der zur Beschleunigung der bewegten Massen dienende Effekt W_B beträgt

$$W_B = \frac{d}{dt}\left(\frac{M v^2}{2}\right) = M v \frac{dv}{dt} = c_4 v \frac{dv}{dt} \text{ Watt.}$$

Digitized by Google

M ist die auf den Ankerumfang reduzierte Masse der rotierenden Teile.

Der gesamte dem Anker zugeführte Effekt ist somit

$$W_L + W_B + J^2 R_g = P_m J$$

oder

$$W_L + W_B = P_m J - J^2 R_g = E_a J,$$

wo P_m die Spannung zwischen den Bürsten ist.

$$E_a J = c_1 v + c_2 v^{1,5} + c_3 v^2 + c_4 v \frac{dv}{dt}.$$

Nun ist bei konstanter Erregung, wenn man von der Ankerrückwirkung absieht, die induzierte EMK der Geschwindigkeit proportional

$$E_a = c v$$

und es ergibt sich daher

$$J = \frac{c_1}{c} + \frac{c_2}{c}\sqrt{v} + \frac{c_3}{c} v + \frac{c_4}{c}\frac{dv}{dt}$$

$$J = c_1' + c_2'\sqrt{v} + c_3' v + c_4'\frac{dv}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (153)$$

Wir können uns nun den Strom J in zwei Teile zerlegt denken, von welchen der eine J_L von der Leerlaufarbeit und der andere J_B von der Beschleunigungsarbeit herrührt.

$$J_L = c_1' + c_2'\sqrt{v} + c_3' v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (154)$$

$$J_B = c_4'\frac{dv}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (155)$$

Die Leerlaufkomponente J_L ist für jede Geschwindigkeit v gleich dem Leerlaufstrom, welche der betreffende Motor jeweils aufnehmen würde, wenn er mit der Geschwindigkeit v konstant weiterliefe, und da sich nach Gl. 154 die Abhängigkeit des Leerlaufstromes von der Umdrehungsgeschwindigkeit bei Nebenschlußmotoren mit großer Annäherung als Gerade darstellen läßt, kann man statt

$$J_L = c_1' + c_2'\sqrt{v} + c_3' v$$

auch schreiben

$$J_L = C_1 + C_2 v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (156)$$

Der übrige Teil der Anlaufstromstärke wird zur Beschleunigung verwandt, und zwar ist die Beschleunigung $\frac{dv}{dt}$ ihm proportional.

Denkt man sich den Anlaßwiderstand eine Zeitlang konstant gehalten, den Kontakthebel also auf einem Kontakte belassen, so

Digitized by Google

wird die Geschwindigkeit so lange steigen, als eine Beschleunigungskomponente J_B der Stromstärke verfügbar oder $J > J_L$ ist.

Nun gilt allgemein

$$J = \frac{P - E_a}{R},$$

worin R der gesamte Widerstand ist.

$$J_B = J - J_L = \frac{P - E_a}{R} - (C_1 + C_2 v)$$

$$J_B = \frac{P}{R} - C_1 - v\left(\frac{c}{R} + C_2\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (157)$$

Man sieht hieraus, daß die Beschleunigungskomponente J_B mit dem Ansteigen der Geschwindigkeit allmählich verschwindet; die Geschwindigkeit nähert sich also für jede Stufe des Vorschaltwiderstandes einem bestimmten Endwerte, der dann erreicht wird, wenn die Stromstärke gleich der entsprechenden Leerlaufstromstärke geworden ist.

Der Anlauf eines belasteten Nebenschlußmotors unterscheidet sich prinzipiell nicht von den betrachteten Vorgängen. Die Beschleunigungsarbeit und somit die Konstante c_4' vergrößert sich nur entsprechend und zu den betrachteten Teilen des Energieverbrauchs tritt ein neues Glied hinzu, das der geleisteten Nutzarbeit entspricht.

Im allgemeinen wird die Überwindung einer konstanten hemmenden Kraft gefordert werden, der ein konstantes Drehmoment, bezw. eine konstante Ankerstromstärke entspricht, so daß jeweils ein bestimmter Teil J_P der Anlaufstromstärke für die Belastung erforderlich ist. Die Anlaufstromstärke teilt sich demnach hier in drei Teile:

I. Leerlaufstromstärke (J_L),
II. Belastungsstromstärke (J_P),
III. Beschleunigungsstromstärke (J_B).

Belastungsstrom und Leerlaufstrom ergeben zusammen den Betriebsstrom, welchen der Motor für die verschiedenen Geschwindigkeiten braucht, und dieser ist in den obenstehenden Ableitungen an Stelle des Leerlaufstromes einzusetzen. Es ergibt sich für jede Stufe des Anlaßwiderstandes wieder ein Minimalwert der Stromstärke und ein Maximalwert der Geschwindigkeit. Der Minimalwert wird gleich der gewöhnlichen Betriebsstromstärke des Motors, welche für alle Geschwindigkeiten annähernd konstant sein wird, wenn J_L klein ist gegen J_P; die Anlaufstromstärke muß daher stets größer als diese gewählt werden.

Digitized by Google

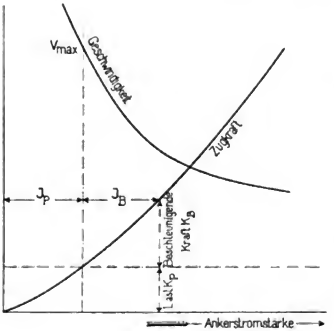


Fig. 385.

Bei Betrachtung des Anlaufes von Hauptschlußmotoren können wir uns auf das Anlassen unter Belastung beschränken. Gegenüber den bisherigen Betrachtungen stellt sich jedoch die Schwierigkeit ein, daß das induzierende Feld nicht mehr konstant, sondern von der Stromstärke abhängig ist. In Fig. 385 sind für einen bestimmten Vorschaltwiderstand Anzugskraft und Geschwindigkeit eines Hauptschlußmotors als Funktion der Stromstärke aufgetragen.

Einen Teil der Anzugskraft (K_P) beansprucht die Belastung, der Rest ist als beschleunigende Kraft verfügbar (K_B). Mit steigender Geschwindigkeit fällt die Stromstärke bis zu dem Werte, für welchen die beschleunigende Kraft gleich Null wird. Man kann also auch hier die Stromstärke in eine Belastungskomponente J_P und in eine Beschleunigungskomponente J_B zerlegen.

Die Beschleunigung ist jedoch hier nicht mehr der beschleunigenden Stromstärke proportional.

Zwischen Hauptschluß- und Nebenschlußmotoren stehen in ihrer Wirkungsweise die Motoren mit Doppelschlußwicklung. Die Entwicklungen für Hauptschlußmotoren lassen sich sinngemäß auch für sie anwenden.

81. Anlaufzeit, Anlaufstromstärke und Anlaufverlust.

Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, daß der Anlaufsvorgang wesentlich durch die Anlaufstromstärke bestimmt ist. Es wird daher notwendig sein, die Bedingungen, welche bei der Wahl derselben in Frage kommen, näher zu betrachten. Wir werden später sehen, daß es für ruhigen stoßfreien Anlauf am zweckmäßigsten ist, die Anlaufstromstärke möglichst konstant zu halten.

Wir werden daher im folgenden mit einer konstanten mittleren Anlaufstromstärke rechnen.

Durch diese mittlere Anlaufstromstärke wird die Beschleunigung und damit auch die gesamte Anlaufzeit bestimmt, welche der Motor

Digitized by Google

braucht, um seine volle Geschwindigkeit zu erreichen. Der Zusammenhang zwischen Anlaufstromstärke und Anlaufzeit ergibt sich, wie folgt. Einer konstanten mittleren Anlaufstromstärke entspricht, wenn man die Betriebsstromstärke für alle Geschwindigkeiten konstant annimmt, eine konstante Beschleunigungskomponente bezw. ein konstantes beschleunigendes Drehmoment ϑ_B.

Sei T die gesamte Anlaufzeit in sec,

ω_n die Winkelgeschwindigkeit, auf welche der Motor zu bringen ist, in sec^{-1},

ϑ das gesamte Drehmoment in kgm,

ϑ_P das für die Belastung nötige Drehmoment in kgm,

J_s das Massenträgheitsmoment in bezug auf die Achse in kgm/sec^2,

dann ergibt sich

$$\vartheta_B = J_s \frac{d\omega}{dt}$$

$$\int_0^T \vartheta_B \, dt = \int_0^{\omega_n} J_s \, d\omega$$

$$\vartheta_B T = J_s \omega_n = (\vartheta - \vartheta_P) T.$$

Setzt man das beschleunigende Drehmoment gleich einem Teil α des normalen Drehmomentes

$$\vartheta_B = \alpha \vartheta_P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (158)$$

und weiter

$$\vartheta_P = 716 \frac{(PS)_{Anl}}{n} \text{ kgm}$$

$$J_s = \frac{\Sigma (G D^2)}{4 \cdot 9{,}81} \text{ kgm/sec}^2$$

$$\omega_n = \frac{\pi n}{30} \text{ sec}^{-1},$$

so wird die Anlaufzeit[1])

$$T = \frac{J_s \omega_n}{\vartheta_B} = \frac{\Sigma (G D^2) n^2}{270000 \, \alpha \, PS_{Anl}} \text{ sec.} \quad . \quad . \quad . \quad (159)$$

Es ist PS_{Anl} die dem Anlaufdrehmoment entsprechende, auf normale Tourenzahl des Motors bezogene Leistung in PS und

$$\alpha = \frac{\vartheta}{\vartheta_P} - 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (160)$$

[1]) In der Preisliste „Anlasser- und Regulierapparate für Gleichstrommotoren" der Siemens-Schuckertwerke kommt eine ähnliche Formel vor.

Digitized by Google

Man kann aus Gl. 159 auch umgekehrt für eine gegebene Anlaufzeit T das notwendige Drehmoment ϑ mit Hilfe des Faktors α berechnen und hiermit die zugehörige Anlaufstromstärke finden; diese wird natürlich um so größer, je kürzer die Anlaufzeit ist.

Die Energieverluste (A_v) durch Stromwärme in der Ankerwicklung und in den Anlaßwiderständen während der Anlaufperiode, welche bei Motoren, die oft angelassen und abgestellt werden, den gesamten Energieverbrauch der Anlage wesentlich mitbestimmen, hängen hauptsächlich von der Anlaufzeit und somit auch von der Anlaufstromstärke ab. Der gesamte Energieverbrauch während der Anlaßperiode beträgt PJT Wattsekunden. Ist die mittlere Anlaufstromstärke, also auch die mittlere Beschleunigung konstant, so ist v und somit E_a proportional t, wenn t die Zeit vom Anfang des Anlassens an bedeutet. Man kann somit schreiben

$$E_a = \frac{t}{T} P.$$

Unter Vernachlässigung der Reibungs- und Eisenverluste ist die mechanisch abgegebene Leistung jeweils $E_a J$, der Rest der zugeführten Energie wird in Wärme verwandelt.

$$A_v = \int_0^T (PJ - E_a J)\, dt = \int_0^T PJ \left(1 - \frac{t}{T}\right) dt = \frac{1}{2} PJT \quad . \quad (161)$$

Etwa die Hälfte der während der Anlaufzeit zugeführten Energie geht also in den Widerständen als Stromwärme verloren.

Den Einfluß der Größe der Anlaufstromstärke auf diese Verluste läßt folgende Berechnung erkennen:

Für einen unter Last anlaufenden Nebenschlußmotor findet man bei Einführung von Gl. 155, S. 410

$$dt = \frac{c_4'}{J_B} dv$$

und $E_a = cv$ in Gl. 161

$$A_v = \int_0^{v_n} (P - cv) \frac{J}{J_B} c_4'\, dv = \frac{J}{J_B} c_4' \left(P v_n - c \frac{v_n^2}{2}\right) = \text{Konst.} \frac{J}{J_B},$$

$$\text{und da } \frac{J}{J_B} = \frac{J_B + J_P}{J_B} = 1 + \frac{J_P}{J_B}, \text{ folgt}$$

$$A_v = \text{Konst.} \left(1 + \frac{J_P}{J_B}\right) \text{ Wattsec} \quad . \quad . \quad . \quad (162)$$

Digitized by Google

Da J_P für eine gegebene Belastung einen bestimmten Wert hat, werden die Verluste also um so kleiner, je größer man die mittlere Anlaufstromstärke wählt.

Je kleiner diese Energiemenge, welche, abgesehen von der Stromwärme im Anker, vom Anlasser aufgenommen wird, ist, desto kleiner kann man den ganzen Apparat bauen.

Kurze Anlaufzeit, geringer Energieverlust und kleine Abmessungen des Anlaßwiderstandes weisen also darauf hin, daß man die Anlaufstromstärke so groß als möglich wählen soll. Der Maximalwert, bis zu welchem man hier gehen kann, wird durch eine Reihe anderer Faktoren bedingt. Hier ist zu unterscheiden zwischen den Fällen, bei welchen der Anlauf den ganzen Betrieb wesentlich bestimmt und die Größe der Motoren speziell mit Rücksicht darauf festgesetzt wird (Krane, Aufzüge, Straßenbahnen), und der Aufgabe, einen Anlasser für einen gegebenen Motor zu entwerfen. Im ersten Falle sind der Stromstärke Grenzen gesetzt durch die Beanspruchung der Zuleitungen und Generatoren und die Spannungsschwankungen im Netz, durch den höheren Preis größerer Motoren und endlich durch die Übertragungsorgane, wie Riemen, Seile usw., welche bei zu hoher Anlaufstromstärke, bezw. Anzugskraft gleiten. Bei Straßenbahnmotoren setzt hier das Schleudern der Räder eine Grenze. Auch darf bei diesen die Beschleunigung schon deswegen nicht zu groß werden, damit das Anfahren für die Fahrgäste nicht störend wird.

Bei Anlaßwiderständen für Motoren, deren Größe durch den Dauerbetrieb bestimmt ist, wird es sich meistens um Fälle handeln, bei welchen die Anlasser nur in größeren Zeitintervallen in Tätigkeit zu treten haben. Läuft der Motor leer an, so wird man die Anlaufstromstärke kleiner oder gleich der Betriebsstromstärke wählen. Für Anlauf unter Last muß, wie oben angeführt wurde, die Anlaufstromstärke größer sein, als die gewöhnliche Betriebsstromstärke. Es kommt demnach hier die Überlastungsfähigkeit des Motors für kurze Beanspruchungen in Betracht. Diese ist meist durch die Funkengrenze gegeben, da die mit Rücksicht auf Erwärmung zulässigen Stromstärken für kurze Belastungsdauer sehr hoch sind. In dieser Hinsicht sind somit Motoren mit künstlicher Kommutation bedeutend günstiger und kann man bei diesen sehr hohe Anlaufstromstärken zulassen. Auch verhalten sich Hauptstrommotoren günstiger als Nebenschlußmotoren, da bei ihnen das kommutierende Feld bei steigender Belastung durch das gleichzeitige Anwachsen des Erregerstroms gestärkt wird. Am besten wird man die Überlastungsfähigkeit der einzelnen Motortypen durch Versuche feststellen.

Digitized by Google

82. Stufung der Anlaßwiderstände.

Vorerst soll nur von Metallwiderständen die Rede sein, die Flüssigkeitswiderstände werden später behandelt. Die Konstruktion der Drahtwiderstände bedingt es, daß sich der Widerstand bei Drehung des Kontakthebels nicht allmählich ändert, sondern daß er sprungweise einen andern Wert annimmt, wenn der Kontakthebel von einem Kontakt zum folgenden übergeht. Die Anlaufstromstärke wird nun, abgesehen von der Wirkung der Selbstinduktion, in jedem Augenblick bestimmt durch den Gesamtwiderstand R zwischen den Zuführungsklemmen und die gegenelektromotorische Kraft des Ankers E_a

$$J = \frac{P - E_a}{R}.$$

Eine plötzliche Änderung des Widerstands wird die Stromstärke daher stark beeinflussen; und zwar sind die Vorgänge hier bei Nebenschlußmotoren andere als bei Seriemotoren.

Bei Nebenschlußmotoren hängt die induzierte EMK, da die Erregung konstant bleibt, allein von der Umdrehungszahl ab; sie kann sich daher nur allmählich ändern. Eine plötzliche Änderung von R wird eine gleiche Änderung von J zur Folge haben, wobei allerdings die Selbstinduktion des Ankers das augenblickliche Anwachsen des Stromes etwas verzögert. Dieser Zuwachs erhöht, da die Belastungs- und Leerlaufstromstärke für annähernd konstante Geschwindigkeit denselben Wert beibehalten, allein die Beschleunigungsstromstärke, und es wird daher eine plötzliche Änderung der Beschleunigung eintreten, welche sich, wenn die Stromschwankung zu stark war, als mechanischer Stoß äußert, dessen Intensität dem Sprung der Stromstärke entspricht.

Bei Hauptstrommotoren ist das Magnetfeld und daher auch die induzierte EMK vom Strome abhängig; wächst der Ankerstrom, so wächst gleichzeitig auch E_a entsprechend der Magnetisierungskurve. Ferner tritt hier zu der Selbstinduktion des Ankers die stärkere Selbstinduktion des Feldes hinzu, und beide Umstände wirken darauf hin, die Änderung des Stromes bei Änderung des Vorschaltwiderstandes abzuschwächen, bezw. zu verlangsamen. Man kann daher die Anlaßwiderstände unter sonst gleichen Umständen für Hauptstrommotoren gröber abstufen als für Nebenschlußmotoren. Dabei darf man jedoch nicht zu weit gehen, denn es ist zu berücksichtigen, daß bei Hauptschlußmotoren einer bestimmten Änderung der Stromstärke eine größere Änderung der beschleunigenden Kraft entspricht als bei Nebenschlußmotoren,

Digitized by Google

da diese hier von der Stromstärke in doppelter Hinsicht beeinflußt wird.

Man wird demnach bei der Stufung der Anlasser darauf zu sehen haben, daß allzugroße Schwankungen der Ankerstromstärke möglichst vermieden werden. Dieser Bedingung kann man am besten entsprechen, wenn man die Stufen so bemißt, daß die Stromstöße beim Übergang von einer Stufe zur andern alle möglichst gleich werden, oder mit andern Worten, daß die Stromstärke beim Anlassen zwischen einem Maximal- und einem Minimalwert schwankt. Auf Grund dieser Forderung läßt sich nach Prof. H. Görges[1]) die Stufung der Anlaßwiderstände für Nebenschlußmotoren wie folgt berechnen.

Bezeichne

J_{max} den angenommenen Maximalwert der Anlaufstromstärke,
J_{min} den Minimalwert,
R_0, R_1, R_2 usw. den Gesamtwiderstand des Stromkreises bei Einstellung des Kontakthebels auf den ersten, zweiten, dritten usw. Kontakt des Anlaßwiderstandes,
r_1, r_2, r_3 usw. die einzelnen Stufen des Anlaßwiderstandes,
m die Stufenzahl,
R_g den Anker- und Übergangswiderstand.

Der Gesamtwiderstand R_0, bei dem der Ankerwiderstand mit einbegriffen ist, berechnet sich zu

$$R_0 = \frac{P}{J_{max}}.$$

In Fig. 386 ist $\overline{AC} = J_{max}$, $\overline{BC} = J_{min}$ und $\overline{AD} = P = J_{max} R_0$.

Läuft der Motor an, so steigt die gegenelektromotorische Kraft und die Stromstärke fällt. Hat diese den Wert J_{min} erreicht, so ist die induzierte EMK

$$E_{a1} = P - J_{min} R_0.$$

In Fig. 386 ist $J_{min} R_0 = EF$ und $E_{a1} = BE$. Es stellt somit die Gerade AE die Abhängigkeit des Stromes von der induzierten EMK E_a dar. Da bei Nebenschlußmotoren Φ konstant ist, so ist E_a direkt der Tourenzahl proportional und es stellt somit die

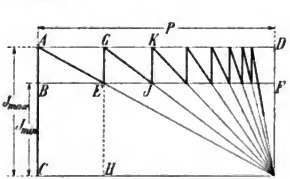


Fig. 386.

[1]) ETZ 1894, S. 644 und Elektrische Bahnen 1906, S. 249.

Digitized by Google

Gerade AE auch die Abhängigkeit des Stromes von der Tourenzahl dar.

Soll J_{min} nicht unterschritten werden, so ist, wenn diese Stromstärke erreicht ist (Punkt E), die erste Stufe des Anlassers abzuschalten, und zwar soll dabei der Strom wieder den Wert J_{max} annehmen. Da die induzierte EMK während des Umschaltens konstant bleibt, so können wir schreiben

$$P - J_{max} R_1 = E_{a1} = P - J_{min} R_0$$

$$J_{max} R_1 = J_{min} R_0$$

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha.$$

Bezugnehmend auf Fig. 386 steigt bei der Abschaltung der ersten Stufe der Strom von $\overline{HE}$ auf $\overline{HG}$. Es ist somit $\overline{GD} = J_{max} R_1$. Der Motor beschleunigt sich jetzt und der Strom fällt mit zunehmender Geschwindigkeit nach der Geraden $\overline{GJ}$. Bei J ist der Strom wieder J_{min} und es muß eine neue Stufe abgeschaltet werden usf. Bei einem nach diesen Annahmen berechneten Anlasser stellt somit die dick ausgezogene Zickzacklinie die Abhängigkeit des Stromes von der Tourenzahl dar.

Wir fanden für die erste Stufe

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha.$$

Dasselbe gilt, wie ein Blick auf die Fig. 386 zeigt, auch für alle folgende Stufen, somit:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha, \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha, \quad \frac{R_3}{R_2} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha \text{ usw.} \quad (163)$$

In Fig. 386 ist $\overline{AD} = J_{max} R_0$, $\overline{GD} = J_{max} R_1$, $\overline{KD} = J_{max} R_2$ usf., so daß die Strecken $\overline{AD}$, $\overline{GD}$, $\overline{KD}$ in bestimmtem Maßstabe die Widerstände R_0, R_1, R_2 darstellen. Die Strecken $\overline{AG}$, $\overline{GK}$ usf. stellen in demselben Maßstab die Widerstände r_1, r_2 usf. der einzelnen Stufen dar.

Aus der Gl. 163 geht hervor:

$$\left.\begin{aligned} R_0 &= R_0 \\ R_1 &= \alpha R_0 \\ R_2 &= \alpha R_1 = \alpha^2 R_0 \\ R_3 &= \alpha R_2 = \alpha^3 R_0 \\ R_x &= \alpha R_{x-1} = \alpha^x R_0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (164)$$

Digitized by Google

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= R_0 - R_1 = (1 - \alpha)\, R_0 = (1-\alpha)\frac{P}{J_{max}} \\ r_2 &= R_1 - R_2 = (\alpha - \alpha^2)\, R_0 = \alpha\, r_1 \\ r_3 &= R_2 - R_3 = (\alpha^2 - \alpha^3)\, R_0 = \alpha^2 r_1 \\ r_x &= R_{x-1} - R_x = (\alpha^{x-1} - \alpha^x)\, R_0 = \alpha^{x-1} r_1 \end{aligned}\right\} \quad (165)$$

Die Stufung hat demnach nach einer geometrischen Reihe zu erfolgen. Für die letzte Stufe des Anlassers $R_{m-1} - R_g$ gilt, da nach deren Abschalten nur noch der Ankerwiderstand im Stromkreis liegt,

$$P - R_{m-1} J_{min} = P - R_g J_{max},$$

woraus folgt

$$R_g = \alpha\, R_{m-1}.$$

Da nun

$$R_{m-1} = \alpha^{m-1} R_0,$$

so ergibt sich

$$R_g = \alpha^m R_0 = \alpha^m \frac{P}{J_{max}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (166)$$

Daraus geht hervor, daß, wenn der Anlasser den gestellten Bedingungen genau entsprechen soll, die Stufenzahl m und das Verhältnis $\frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha$ in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen müssen.

Für Hauptstrommotoren führt die Bedingung, daß die Stromstärke zwischen zwei Grenzen verlaufen soll, zu folgender einfacher Konstruktion, welche von Prof. O. S. Bragstad angegeben wurde.

Für einen bestimmten Ankerstrom, also konstante Feldstärke, ist die induzierte EMK der Geschwindigkeit proportional.

$$E_a = P - J\,R = c\,v$$

Wollte man daher bei vollständig konstanter Stromstärke J anlassen, so müßte man bei steigender Geschwindigkeit den Widerstand R so variieren, daß stets obige Gleichung erfüllt ist; der jeweils notwendige Widerstand ist also eine lineare Funktion der Geschwindigkeit. Die Gerade, welche dieser Abhängigkeit entspricht, ist leicht zu konstruieren:

Man ermittelt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit des betreffenden Motors von der Stromstärke für kurzgeschlossenen Anlasser, also einen Gesamtwiderstand des Stromkreises R gleich dem Motorwiderstand R_m (Anker und Feld) entweder experimentell oder aus der Charakteristik nach Bd. I, S. 618 graphisch und entnimmt der Kurve den Wert für die betreffende Stromstärke J. Diese Geschwindigkeit ergibt den Punkt der Geraden, wo $R = R_m$. Einen

Digitized by Google

zweiten Punkt erhält man aus der Beziehung, daß für die Geschwindigkeit Null der Widerstand

$$R_0 = \frac{P}{J}.$$

Durch diese beiden Punkte ist die Gerade festgelegt. Konstruiert man nun (Fig. 387) die beiden Widerstandsgeraden AB und CD für $J = J_{max}$ und $J = J_{min}$, so erhält man den Zusammenhang zwischen Widerstand und Geschwindigkeit für diese beiden Grenzen der Stromstärke.

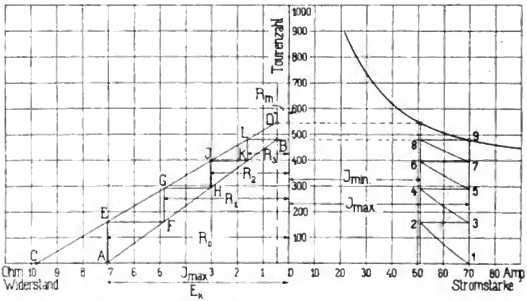


Fig. 387. Stufung eines Anlaßwiderstands für Hauptstrommotoren.

Beim Einschalten mit dem Widerstand R_0 erhalten wir den Strom J_{max}. Dann steigt die Geschwindigkeit und die Stromstärke sinkt. Der Widerstand bleibt dabei konstant, und das Ansteigen der Geschwindigkeit als Funktion des Widerstandes wird durch die Ordinate im Punkt A dargestellt. Der Punkt E, in dem diese die J_{min}-Linie schneidet, gibt die Geschwindigkeit, bei welcher der Strom die Grenze J_{min} erreicht.

Bei dieser Geschwindigkeit muß die erste Stufe des Anlassers ausgeschaltet werden. Soll dabei die Stromstärke den Wert J_{max} annehmen, so ist der Widerstand R_1 durch die Gerade AB bestimmt, und man findet ihn, indem man durch E eine Parallele zur Abszissenachse legt, welche die Gerade AB in F schneidet.

Die erste Stufe des Anlassers wird demnach gleich EF. Analog findet man die übrigen Stufen des Widerstandes GH, JK usw.

Digitized by Google

83. Gang der Berechnung eines Anlaßwiderstandes.

Ist die maximale Anlaufstromstärke gemäß den Überlegungen im Abschnitt 81 festgesetzt, so berechnet sich der gesamte Anlaßwiderstand

$$R_v = \frac{P}{J_{max}} - R_g.$$

Würde die plötzliche Entnahme der Stromstärke J_{max} aus dem Netz zu große Spannungsschwankungen verursachen, so sind einige Vorstufen anzuordnen.

Ist die Anlaufzeit gegeben, so kann man mittelst Gl. 159, S. 413 die mittlere Anlaufstromstärke $\frac{J_{max} + J_{min}}{2}$ finden, und damit ist auch J_{min} gegeben. Im allgemeinen wird jedoch eine bestimmte Schaltertype mit einer gegebenen Stufenzahl m verwendet werden müssen. Für Nebenschlußmotoren gestaltet sich auch dann die Berechnung sehr einfach. Nach Gl. 166, S. 419 muß sein:

$$R_g = \alpha^m \frac{P}{J_{max}},$$

woraus folgt

$$\log \alpha = \frac{1}{m} \log \left(\frac{J_{max} R_g}{P} \right).$$

Man kann aus dieser Gleichung α berechnen und die Stufen entweder nach Gl. 165, S. 419 berechnen, oder nach Fig. 386, S. 417 graphisch konstruieren. Ein noch einfacheres Verfahren ergibt sich in folgender Weise:[1])

Man legt einen Papierstreifen auf die Skala des Rechenschiebers und teilt die Strecke zwischen R_g und R_a in m gleiche Teile; dann geben die den Teilstrichen entsprechenden Zahlen des Rechenschiebers die Stufung des Widerstands an.

Der Beweis gestaltet sich wie folgt:

$$R_g = \alpha^m R_a$$

$$\log \alpha = \frac{\log R_g - \log R_a}{m}$$

$$\text{num}\,(\log R_a + \log \alpha) = \alpha R_a = R_1$$

$$\text{num}\,(\log R_a + 2 \log \alpha) = \alpha^2 R_a = R_2 \text{ usf.}$$

Bei Anlassern für Hauptstrommotoren läßt sich J_{min} nicht auf gleich einfache Weise finden, man wird hier am raschesten

[1]) E. A. N. Pochin, Anlaßwiderstände. ETZ 1897, S. 346.

Digitized by Google

durch Ausprobieren zum Ziel kommen, was sich bei der Einfachheit der angegebenen Methode leicht bewerkstelligen läßt.

Beispiel. Für einen Hauptstrommotor von normal 35 PS, 500 Volt, 60 Amp., dessen Tourendiagramm in Fig. 387, S. 420 gegeben ist, soll der Anlaßwiderstand berechnet werden. Es soll eine Kontrollertype mit 5 Kontakten (entsprechend 4 Widerstandsstufen) zur Verwendung kommen. Der Widerstand von Feld und Anker des Motors betrage zusammen 0,45 Ω.

Die Größe der Hauptstrommotoren wird meist mit Rücksicht auf die Anzugskraft, welche sie beim Anlauf zu entwickeln haben, gewählt. Wir wollen daher mit der maximalen Anlaufstromstärke in der Nähe der normalen von 60 Amp. bleiben, um eine mittlere Anzugskraft zu erhalten, welche etwa dieser Stromstärke entspricht.

Setzen wir als Maximalgrenze 70 Amp. fest, so finden wir in dem Tourendiagramm eine zugehörige Tourenzahl von 480 Touren, welche in das Widerstandsdiagramm bei 0,45 Ω einzutragen ist (Punkt B).

Der zweite Punkt der Widerstandsgeraden für $J = 70$ Amp. ergibt sich daraus, daß für

$$v = 0, \qquad R_o = \frac{P}{J} = \frac{500}{70} = 7{,}1\ \Omega$$

sein muß (Punkt A). Die andere Widerstandsgerade findet man leicht durch Ausprobieren, indem man verschiedene Werte J_{min} annimmt und die Gerade mit Hilfe der beiden gegebenen Bedingungen so legt, daß die Zickzacklinie vierstufig wird. Diese Bedingung wird durch die Stromstärke $J_{min} = 50{,}1$ Amp. erfüllt, und man erhält als Widerstandsstufen

$$r_1 = 2{,}2\,, \qquad r_2 = 1{,}8\,, \qquad r_3 = 1{,}45\,, \qquad r_4 = 1{,}15\,.$$

Bei einem Nebenschlußmotor gleicher Größe mit einem Anker- und Übergangswiderstand $R_g = 0{,}25\ \Omega$ ergeben sich bei derselben maximalen Anlaufstromstärke die Stufen zu

$$r_1 = 4{,}0\,, \qquad r_2 = 1{,}78\,, \qquad r_3 = 0{,}75\,, \qquad r_4 = 0{,}32\,.$$

J_{min} wird hier gleich 30 Amp. Man sieht, daß für gleiche Stufenzahl die Stromstöße bei Nebenschlußmotoren bedeutend größer werden als bei Hauptschlußmotoren, wie dies oben begründet worden ist.

84. Berechnung der Bremswiderstände.

Die elektrische Bremsung eines Motors wird dadurch erreicht, daß man ihn als Generator auf einen Widerstand arbeiten läßt; er wird dann von den bewegten Massen angetrieben, wodurch

Digitized by Google

deren kinetische Energie rasch aufgezehrt wird. Bei der Bremsung von Nebenschlußmotoren geht man dabei am besten so vor, daß man die Erregung am Netz beläßt und den Anker durch einen Widerstand schließt, den man bei sinkender Geschwindigkeit allmählich verringert. Die Anwendung von Selbsterregung während der Bremsperiode verringert die Bremswirkung sehr stark. Bei Hauptschlußmotoren wird bei der elektrischen Bremsung natürlich Selbsterregung angewandt. Hier ist darauf zu achten, daß bei Umschaltung des Motors zum Generator entweder die Pole des Ankers oder die des Feldes zu vertauschen sind, da der Hauptstrommotor nur dann als Generator wirken kann (Bd. I, S. 251).

Um eine möglichst gleichmäßige und starke Bremswirkung zu erzielen, muß die Stufung der Bremswiderstände ähnlich wie die der Anlaßwiderstände so erfolgen, daß die Stromstärke zwischen zwei Grenzen J_{min} und J_{max} gehalten wird, woraus sich ergibt, daß die Berechnung dieser Stufung nach den gleichen Methoden erfolgen kann, welche für Anlaßwiderstände angegeben wurden.

I. Bremswiderstände für Nebenschlußmotoren. Da ebenso wie beim Anfahren die Erregung während des Bremsens konstant bleibt, gilt auch hier ganz allgemein und unabhängig von der Ankerstromstärke die Gleichung

$$E_a = cv.$$

Diese induzierte EMK erzeugt bei einem Gesamtwiderstand des Stromkreises R einen Strom

$$J = \frac{E_a}{R}.$$

Für die Wahl der Grenzstromstärken J_{min} und J_{max} gelten die gleichen Erwägungen wie beim Anlassen. J_{max} ist, um eine möglichst starke Bremswirkung zu erreichen, möglichst hoch zu wählen, wird jedoch durch das Gleiten der Übertragungsorgane und die Abmessungen der Maschine begrenzt. J_{min} wird hier meist durch die Stufenzahl bestimmt.

Der gesamte Bremswiderstand R_0 ist so zu berechnen, daß, wenn der Anker bei maximaler Tourenzahl auf diesen Widerstand geschaltet wird, die maximale Stromstärke nicht überschritten wird.

$$J_{max} R_0 = E_{a\,max} = c\,v_{max}.$$

Mit sinkender Geschwindigkeit sinken Spannung und Stromstärke, und man erhält für die Grenze J_{min} die Gleichung

$$J_{min} R_0 = E_{a1} = c\,v_1.$$

Beim Einschalten der nächsten Stufe, bei welcher wieder die maximale Stromstärke erreicht wird, ergibt sich

Digitized by Google

$$J_{max} R_1 = E_{a1} = c v_1,$$

woraus folgt

$$\frac{R_1}{R_o} = \frac{J_{min}}{J_{max}} = \alpha,$$

$$R_1 = \alpha R_o.$$

Analog berechnet sich

$$R_2 = \alpha R_1 = \alpha^2 R_o \text{ usf.},$$

genau wie bei den Anlaßwiderständen für Nebenschlußmotoren. Die Gleichungssysteme 164 und 165, S. 418, gelten also auch für die Berechnung der Bremswiderstände. R_o wird hier gleich $\frac{E_{a\,max}}{J_{max}}$, wobei $E_{a\,max}$ die im Anker bei vollem Lauf induzierte EMK darstellt. Da diese von der Netzspannung P nur wenig verschieden ist, kann man $R_o = \frac{P}{J_{max}}$ setzen, so daß die Berechnung der Anlaß- und Bremswiderstände vollständig gleich wird bezw. bei gleichen Grenzwerten der Stromstärke dieselben Widerstandswerte ergibt.

II. Bremswiderstände für Hauptschlußmotoren.[1]) Für eine bestimmte konstante Stromstärke J gilt auch hier die Gleichung

$$J R = E_a = c v.$$

Um während der Bremsperiode diese Stromstärke konstant zu halten, müßte demnach R proportional mit v geändert werden.

Man erhält also in dem Diagramm Fig. 388, welches die Berechnung der Bremswiderstände für obigen 35 PS-Motor darstellt, für den der Anlaßwiderstand berechnet wurde, und das vollständig dem dort gegebenen Diagramm entspricht, für die Abhängigkeit des Widerstands von der Tourenzahl bei konstanter Stromstärke wieder gerade Linien. Diese müssen, wie sich aus obiger Gleichung ergibt, durch den Nullpunkt gehen. Einen weiteren Punkt für jede Gerade findet man auch hier mit Hilfe der Geschwindigkeitskurve. Bei der Maximalstromstärke von 70 Amp. macht der Motor 480 Touren; die induzierte EMK beträgt dabei $500 - 70 \cdot 0{,}45 = 468{,}5$ Volt, und die Konstante c der Gleichung $E_a = c n$ berechnet sich danach für 70 Amp. Stromstärke zu $\frac{468{,}5}{480} = 0{,}98$.

Beginnt man mit der Bremsung bei der maximalen Tourenzahl von 700 und soll dabei sofort eine Stromstärke von 70 Amp. erhalten werden, so entspricht dem eine induzierte EMK von

[1]) Nach Maximilian Müller. Die elektrische Bremsung der Straßenbahnwagen. ETZ 1902. S. 513.

Digitized by Google

$0{,}98 \cdot 700 = 685$ Volt, und der Gesamtwiderstand des Ankerstromkreises muß daher $\frac{685}{70} = 9{,}8\ \Omega$ betragen. Indem man nun diesen Widerstand $R_o = 9{,}8\ \Omega$ in das Diagramm bei 700 Touren einträgt, erhält man den Punkt A und, indem man diesen mit dem Nullpunkte verbindet, die eine Widerstandsgerade. Analog berechnet sich die Abszisse des Punktes B der anderen Geraden bei 700 Touren zu 13,7 Ω. Der Linienzug zwischen beiden Geraden $ACDE\ldots$ ergibt dann in gleicher Weise, wie bei den Anlaßwiderständen beschrieben wurde, die Widerstandsstufung und der Linienzug 1, 2, 3, 4 den Verlauf der Stromstärke bei richtiger Betätigung des Fahrschalters.

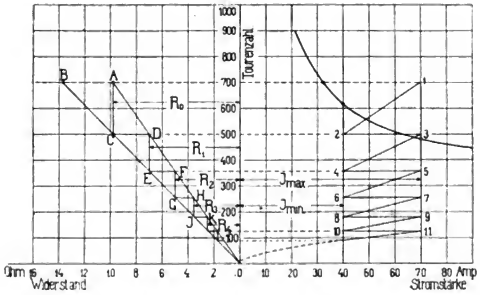


Fig. 388. Stufung der Bremswiderstände für Hauptschlußmotoren.

Das Diagramm zeigt auch gleichzeitig die Nachteile der elektrischen Bremsung. Wird nämlich der Schalter nicht bei der richtigen Geschwindigkeit betätigt, sondern bereits ehe diese erreicht ist, so können bedeutende Überschreitungen der maximal zulässigen Stromstärke vorkommen, was eine Beschädigung des Kommutators zur Folge haben kann.

Ferner ist es nicht möglich, den Wagen durch elektrische Bremsung allein zum Stillstand zu bringen, weil man den Widerstand nicht unter ein gewisses Maß verringern und daher die Stromstärke und die Bremskraft bei niedrigen Tourenzahlen nicht auf der erforderlichen Höhe halten kann.

Digitized by Google

Neunzehntes Kapitel.

85. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zum Konstanthalten der Spannung bei veränderlicher Belastung. — 86. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zur Veränderung der Spannung. — 87. Regulierwiderstände für Motoren.

Die Berechnung von Regulierwiderständen läßt sich naturgemäß nicht von allgemeinen Gesichtspunkten aus betrachten, sondern muß sich in jedem Fall nach dem Zwecke richten, dem der Widerstand dienen soll. Wir beschränken uns hier auf die Behandlung der hauptsächlichsten Fälle.

85. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zum Konstanthalten der Spannung bei veränderlicher Belastung.

Zur Berechnung des Nebenschlußreglers für einen Generator, dessen Spannung konstant gehalten werden soll (Maschinen für elektrische Zentralen), ist es notwendig, die Leerlaufcharakteristik der betreffenden Maschine, ihren Ankerwiderstand und die Ankerrückwirkung für irgend eine bestimmte Belastung zu kennen.

Unter Beachtung der Vorgänge in der Maschine, welche bei steigender Belastung den Spannungsabfall bewirken, ergibt sich dann leicht eine graphische Konstruktion für die Stufen des Nebenschlußreglers.

Die Ursachen des Spannungsabfalls (Ohm'scher Spannungsverlust, Ankerrückwirkung und Tourenabfall der Antriebsmaschine) kann man in bekannter Weise in dem Dreieck BB_1B_2 zusammensetzen (Fig. 389). Die Seite BB_2 stellt die zur Kompensierung der Ankerrückwirkung notwendige Erregerstromstärke i_n' dar:

$$i_n' = \frac{AW_r}{w_n}$$

(w_n = Windungszahl der Erregerwicklung). B_2D ist der Spannungsverlust im Anker; zu diesem ist, falls man die Spannung an den

Digitized by Google

Speisepunkten konstant halten will, der Spannungsverlust in den Speiseleitungen hinzuzufügen.

Der Spannungsabfall, welcher durch das Sinken der Tourenzahl der Antriebsmaschine beisteigender Belastung hervorgerufen wird, läßt sich ebenfalls annähernd berücksichtigen. Er ist dem Tourenabfall prozentual gleich und für konstante Spannung annähernd der Belastung proportional; er kann, wenn der Tourenabfall bei der Vollbelastung J_V $p^0/_0$ beträgt, für irgend eine Belastung J_B ausgedrückt werden durch

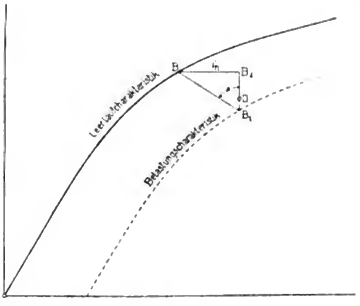


Fig. 389.

$$\varepsilon = \frac{p}{100} \cdot P \frac{J_B}{J_V}.$$

In dem Dreieck ist er durch die Strecke DB_1 dargestellt. Vernachlässigt man die Veränderung der zur Kompensation der Quermagnetisierung dienenden Amperewindungen und nimmt konstante Bürstenstellung an, so werden die Seiten des Dreiecks BB_1B_2 der Belastung proportional und der Winkel α für alle Belastungen konstant.

Zur Berechnung des Regulierwiderstandes wird eine zulässige Abweichung von der Normalspannung anzunehmen sein, so daß sich eine Maximalgrenze E_{max} und eine Minimalgrenze E_{min} ergibt. Die Widerstandsstufen sind dann so zu bemessen, daß bei der Regulierung diese beiden Grenzen innegehalten werden. Nimmt man an, daß bei Leerlauf und einer Spannung E_{min} (Fig. 390, Punkt *A)* der gesamte Regulierwiderstand eingeschaltet sei, so wird der Widerstand der Magnetspulen und der Regulierwiderstand zusammen betragen müssen:

$$R_o = \frac{E_{min}}{i_o} = \operatorname{tg} \lambda_o.$$

Wird nun die erste Stufe des Regulierwiderstandes abgeschaltet,

Digitized by Google

so darf die Spannung nicht über E_{max} hinausgehen (Punkt A'); der Widerstand des Erregerkreises muß demnach sein

$$R_1 = \frac{E_{max}}{i_o'} = \operatorname{tg} \lambda_1 .$$

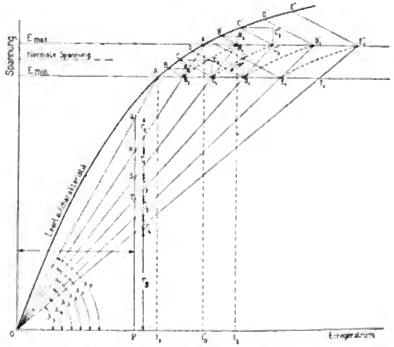


Fig. 390. Stufung eines Nebenschlußreglers zum Konstanthalten der Spannung.

Wird die Maschine allmählich belastet, während der Widerstand des Erregerkreises $R_1 = \operatorname{tg} \lambda_1$ konstant bleibt, so geht die Klemmenspannung auf die Linie $A'O$ zurück und erreicht bei B_1 den Wert E_{min}. Legt man durch B_1 eine Gerade unter dem Winkel α gegen die Ordinate, so schneidet diese die zugehörige induzierte Spannung auf der Leerlaufcharakteristik aus (Punkt B), was man leicht einsieht, wenn man das Dreieck des Spannungsabfalls BB_1B_2 einzeichnet. Damit nun die Grenze E_{min} bei weiterem Steigen der Belastung nicht überschritten wird, ist der Widerstand des Erregerstromkreises jetzt um so viel zu verkleinern, daß die Spannung auf E_{max} steigt. Das Dreieck BB_1B_2 gleitet dabei mit dem Punkte B auf der Leerlaufcharakteristik, während B_1 eine Kurve beschreibt, welche das Ansteigen der Klemmenspannung als Funktion der Erregerstromstärke zeigt. Diese Kurve B_1B_1' ist mit großer Annäherung eine Belastungscharakteristik der Maschine für eine der Seitenlänge des Dreiecks BB_1B_2 entsprechende Belastung und wird (Bd. I, S. 596) gefunden, indem man das Dreieck parallel mit sich längs der Leerlaufcharakteristik verschiebt. Man findet so die Erregerstromstärke i_1, welche das Steigen der Spannung auf E_{max} bewirkt und damit auch den zugehörigen Erregerwiderstand

Digitized by Google

$$R_2 = \frac{E_{max}}{i_1} = \operatorname{tg} \lambda_2.$$

Fährt man mit der Konstruktion in gleicher Weise fort, wobei man die Dreiecke und die Belastungscharakteristiken nicht einzuzeichnen braucht, sondern nur die Strecken B_1B, $B_1'B'$, C_1C, $C_1'C'$ usw., so erhält man eine Schar von Geraden durch den Nullpunkt, deren Neigung gegen die Abszissenachse ein Maß für die notwendigen Regulierwiderstände gibt. Zieht man in passendem Abstande i eine Parallele zur Ordinatenachse (z. B. bei $i = 5$ oder 10 Amp.), so schneiden die Geraden auf dieser die Widerstandsstufen aus.

$$r_0 = R_0 - R_1 = \operatorname{tg} \lambda_0 - \operatorname{tg} \lambda_1 = \frac{QR}{i}.$$

Die Konstruktion gestaltet sich zeichnerisch noch etwas einfacher und übersichtlicher, wenn man die Stücke der Leerlaufcharakteristik $B\,B'$, $C\,C'$, bezw. die Parallelen dazu $B_1\,B_1'$, $C_1\,C_1'$ als Gerade ansieht, was bei den kleinen Abständen von E_{max} und E_{min}, welche für die Regulierung in Frage kommen, meist zulässig ist. Man braucht dann nur (Fig. 391) die Linien $B_1\,B$, $C_1\,C$ usw. zu ziehen und die Geraden $B_1\,B_1'$, $C_1\,C_1'$ parallel zu den Tangenten an die Leerlaufcharakteristik in B, C usw. zu legen, und erhält dadurch sofort die Punkte B_1', C_1', deren Verbindungslinien mit dem Nullpunkte die Widerstandsstufen ergeben.

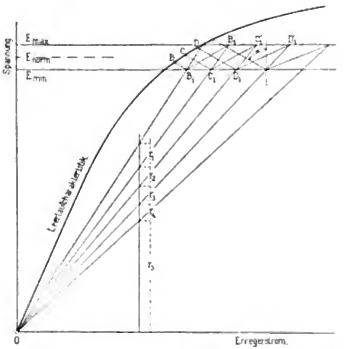


Fig. 391. Stufung eines Nebenschlußreglers zum Konstanthalten der Spannung (Vereinfachte Konstruktion).

Im allgemeinen wird es übrigens nicht notwendig sein, die Berechnung für sämtliche Stufen durchzuführen, sondern man wird vielmehr, da die Konstruktion für jede beliebige Stelle des Regulierbereichs auch für eine einzelne Stufe unabhängig ausgeführt werden kann, nur die Größe von einigen Stufen bestimmen und die übrigen interpolieren.

Bei Fremderregung ist die Konstruktion entsprechend zu modifizieren. Die Erregung ist dann von der Klemmenspannung der

Digitized by Google

Maschine unabhängig, und das Sinken der Spannung bei steigender Belastung verläuft auf einer Ordinate. (Fig. 392.) Die Linien $B_1'C_1$, $C_1'D_1$ usw. ergeben eine Stufung der Erregerstromstärken, aus der die notwendigen Widerstandsstufen berechnet werden können.

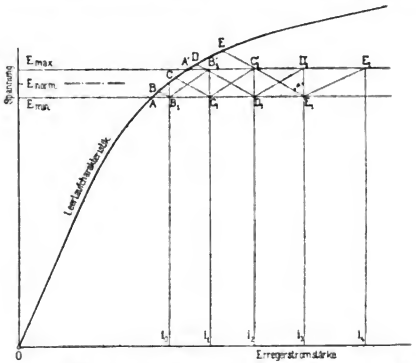


Fig. 392. Stufung des Regulierwiderstandes eines fremderregten Nebenschlußgenerators zum Konstanthalten der Spannung.

Im allgemeinen wird man bei dem Entwurf der Regulierwiderstände nur die berechneten Leerlaufcharakteristiken zur Verfügung haben. Ist ein Widerstand für eine fertige Maschine zu berechnen, deren Leerlaufcharakteristik man experimentell aufnehmen kann, so muß man dabei die bei absteigender Magnetisierung aufgenommene Kurve zugrunde legen, da diese stärker gekrümmt ist und also eine feinere Stufung ergibt, als die bei steigendem Kraftfluß aufgenommene.

86. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren zur Veränderung der Spannung.

Bei Maschinen zum Laden von Akkumulatoren ist es notwendig, die Spannung der Lademaschinen innerhalb weiter Grenzen zu verändern. Will man eine möglichst gleichmäßige Regulierung erzielen, so daß die Spannungsunterschiede zwischen zwei Stufen des Regulierwiderstandes alle gleich werden, so konstruiert man nach Bd. I, Fig. 451 die Belastungscharakteristik für die Ladestromstärke (Fig. 393), teilt den Abstand zwischen der höchsten und niedrigsten

Digitized by Google

notwendigen Spannung in so viele gleiche Teile, als der Widerstand Stufen erhalten soll, und überträgt diese Teilung durch Parallele zur Ordinatenachse auf die Belastungscharakteristik. Zieht man dann von den Teilpunkten Gerade zum Nullpunkte, so schneiden diese auf einer an passender Stelle ($i_n = 5$ oder 10 Amp.) aufgetragenen Ordinate die Widerstandsstufen aus.

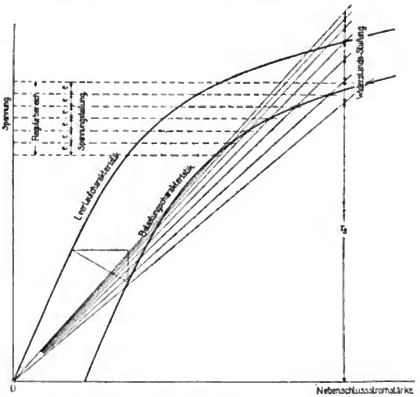


Fig. 393. Stufung des Regulierwiderstandes eines Nebenschlußgenerators mit veränderlicher Spannung.

Ein anderer Fall, der hierher gehört, ist die Berechnung der Feldregulatoren für Erregermaschinen von Wechselstromgeneratoren. Die Stufung der Erregerstromstärken der Wechselstrommaschinen findet man auf die gleiche Art und Weise, wie bei einer fremderregten Gleichstrommaschine. Man kann nämlich mit einer Annäherung, welche für den vorliegenden Fall vollständig genügt, für eine bestimmte Phasenverschiebung den Spannungsabfall bei Wechselstromgeneratoren geradeso wie bei Gleichstrommaschinen durch ein rechtwinkliges Dreieck darstellen, dessen Seiten der Belastung proportional sind.[1]) Die Seite $B_1 B_2$ (Fig. 389, S. 427) dieses Dreiecks stellt den durch Selbstinduktion, effektiven Widerstand und Tourenabfall verursachten Spannungsabfall dar; BB_2 entspricht der Ankerrückwirkung. Beide kann man für gegebene Phasenverschiebung genügend genau proportional der Be-

[1]) Siehe E. Arnold, Die Wechselstromtechnik. Bd. IV, S. 344.

Digitized by Google

lastung setzen. Unter dieser Voraussetzung gelten dieselben Überlegungen, welche wir bei Gleichstrommaschinen angestellt haben, auch für Wechselstromgeneratoren, und wir können das Diagramm Fig. 392 auch hier anwenden. Man legt dabei eine maximale Phasenverschiebung der Berechnung zugrunde, da bei dieser der Spannungsabfall am größten und die Regulierung am schwierigsten wird und die Stufung natürlich auch hierbei noch ein möglichst genaues Konstanthalten der Spannung ermöglichen soll. Die Übertragung der Stufung der Erregerstromstärke auf den Feldregulator der Erregermaschine ist in Fig. 394 dargestellt. Auf der linken

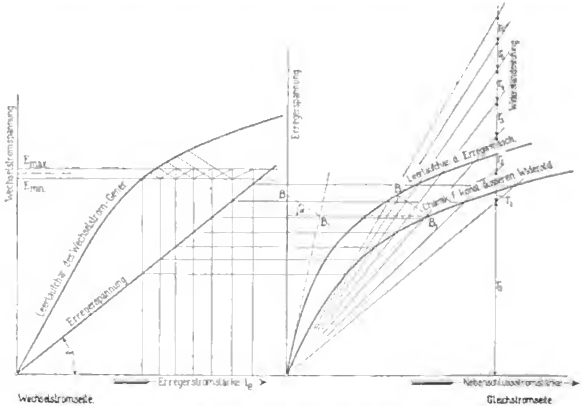


Fig. 394. Stufung des Regulierwiderstandes einer Erregermaschine.

Seite der Figur ist die Leerlaufcharakteristik des Wechselstromgenerators aufgezeichnet und die Konstruktion von Fig. 392 wiederholt. Da der Widerstand des Erregerkreises konstant ist, schneidet eine Gerade durch den Nullpunkt unter dem Winkel, dessen Tangente gleich dem Erregerwiderstand der Wechselstrommaschine R_e ist, auf den Ordinaten die den Erregerstromstärken i_e entsprechenden Klemmspannungen p_{ke} der Erregermaschine aus.[1])

$$p_{ke} = i_e \operatorname{tg} \gamma = i_e R_e.$$

[1]) Siehe E. Hunke, Über graphische Berechnung von Widerstandsregulatoren. ETZ 1900, S. 801.

Digitized by Google

Man zeichnet nun in gleichem Spannungsmaßstabe daneben die Leerlaufcharakteristik der Erregermaschine und konstruiert aus ihr mit Hilfe des Spannungsdreiecks die Charakteristik der Erregermaschine für konstanten äußeren Widerstand, wie in der Figur angedeutet ist, indem man berücksichtigt, daß hier die Ankerstromstärke, also auch die Strecke BB_1 der Klemmspannung proportional ist. Dann überträgt man die Spannungsteilung aus dem linken Diagramm durch Parallele zur Abszissenachse auf die Charakteristik, verbindet die gefundenen Schnittpunkte mit dem Nullpunkt und findet auf gleiche Weise wie oben angegeben die Widerstandsstufung.

87. Regulierwiderstände für Motoren.

Wenn schon bei der Berechnung der Regulierwiderstände für Generatoren nur einige typische Fälle hervorgehoben und behandelt werden konnten, so läßt sich die Berechnung dieser Apparate für Motoren noch viel weniger nach allgemeinen Gesichtspunkten behandeln. Die Anforderungen an die Regulierung sind je nach dem Zwecke, dem der Motor dient, vollständig verschieden; im folgenden können daher nur kurze Angaben über die in Betracht kommenden Faktoren gegeben werden.

Für Motoren gilt die Gleichung

$$P - J_a R = C n \Phi.$$

Die Regulierung wird nun stets eine Einwirkung auf die Tourenzahlen bezwecken, was durch Änderung von P oder Φ erreicht wird. Da sowohl P als auch Φ durch die Widerstandsregulierung nur verringert werden können, wird im einen Fall nur eine Verkleinerung, im andern nur eine Vergrößerung der normalen Tourenzahl erreicht.

Die Variation der dem Motor gebotenen Spannung P durch Vorschaltwiderstände wird trotz ihrer Unwirtschaftlichkeit in einzelnen Fällen, z. B. bei Hebezeugen, angewandt. Man benutzt hier die Anlaßwiderstände zugleich zur Regulierung, was eine einfache Konstruktion der Schalter und Tourenregulierung in weiten Grenzen ergibt. Irgend welche Besonderheit in der Berechnung der Widerstände ergibt sich daraus nicht, da es hier auf die exakte Einhaltung einer Tourenzahl nicht ankommt, und eine genauere Berechnung schon mit Rücksicht darauf nicht möglich ist, daß der Vorschaltwiderstand je nach der Belastung (bezw. Stromstärke) des Motors ganz verschieden auf die Tourenzahl einwirkt. Sehen wir daher von diesem Falle ab, so wird die Regulierung stets durch

Digitized by Google

Einwirkung auf Φ zu erfolgen haben, welche bei Nebenschlußmotoren durch Einschalten von Widerstand in den Erregerkreis, bei Hauptschlußmotoren durch eine Nebenschließung zur Erregerwicklung erreicht wird.

Für Nebenschlußmotoren ist der dabei einzuschlagende Weg in Fig. 395 dargestellt.[1]) In Bd. I, S. 614 wurde gezeigt, daß der Einfluß des Spannungsabfalles im Anker auf die Tourenzahl dem der Ankerrückwirkung entgegenwirkt. Wir wollen daher bei der Berechnung beide Einflüsse unberücksichtigt lassen und annehmen, daß sie sich gegenseitig aufheben. Wir erhalten dann für die Abhängigkeit der Tourenzahl vom Kraftfluß, da die Klemmspannung konstant ist, die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel

$$n = \frac{P}{C\,\Phi} = \frac{\text{Konst.}}{\Phi}.$$

Diese ist auf der linken Seite in das Diagramm eingezeichnet.

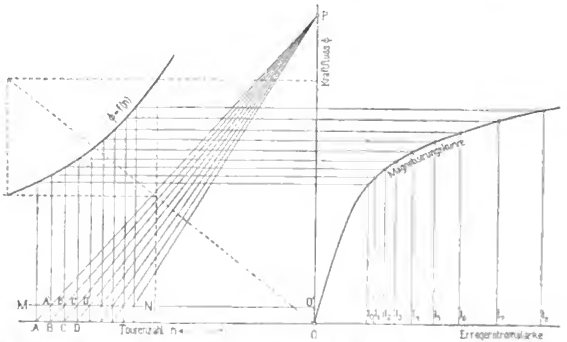


Fig. 395. Stufung des Regulierwiderstandes für einen Nebenschlußmotor.

Auf der rechten Seite ist Kurve $\Phi = f(i_n)$ aufgetragen, welche bei Vernachlässigung der Ankerrückwirkung für alle Belastungen gleich ist und leicht aus der Leerlaufcharakteristik berechnet werden kann

$$\Phi = \frac{P\,10^8}{\frac{N}{a} \cdot \frac{pn}{60}}.$$

[1]) Siehe E. Hunke, Über graphische Berechnung von Widerstandsregulatoren. ETZ 1900, S. 801.

Digitized by Google

Man kann nun, indem man von der einen Seite des Diagramms auf die andere übergeht, für jede Tourenzahl die zugehörige Erregerstromstärke finden.

Für die obere Grenze der Tourenzahl kann man aus dem Diagramm die zugehörige Erregerstromstärke finden, und da die Erregerspannung konstant ist, den entsprechenden Widerstand des Erregerkreises berechnen. Zieht man von diesem den Widerstand der Magnetwicklung ab, so erhält man den gesamten Regulierwiderstand. Die Stufung desselben erfolgt ebenfalls an Hand des Diagramms. Soll innerhalb des Regulierbereichs jede Tourenzahl mit möglichster Annäherung erreicht werden, so sind die Geschwindigkeitsstufen alle gleich zu machen. Will man dagegen, daß die Stromstöße, welche bei der Regulierung auftreten, alle möglichst gleich seien, so ist die Stufung der Tourenzahl in geometrischer Progression vorzunehmen,[1]) so daß die Stufen bei niedrigen Tourenzahlen kleiner, bei höheren größer werden. Nach diesem Prinzip ist die Stufung in Fig. 395 durchgeführt. Die einzelnen aufeinander folgenden Geschwindigkeitsstufen stehen zueinander in einem konstanten Verhältnis; es verhalten sich

$$n_1 : n_2 = n_2 : n_3 = n_3 : n_4 = \ldots = (P - J_{max} R_g) : (P - J_{min} R_g), \quad (167)$$

wenn J_{max} und J_{min} die Grenzen sind, zwischen denen die Stromstärke bei der Regulierung schwanken darf. Man erhält diese Teilung der Tourenzahl, indem man zwischen der Abszissenachse und der ihr parallelen Linie MN einen Linienzug AA', BB', CC', wie Fig. 395 zeigt, so konstruiert, daß die Linien AA', BB', CC' alle durch einen Punkt P der Ordinatenachse gehen, während die Geraden $A'B$, $B'C$, $C'D$ . . als Ordinaten gezogen werden. Dann gilt nämlich:

$$\frac{A\,O}{A'\,O'} = \frac{O\,P}{O'\,P}$$

oder da $A'\,O' = B\,O$ ist,

$$\frac{A\,O}{B\,O} = \frac{O\,P}{O'\,P},$$

und ferner

$$\frac{B\,O}{B'\,O'} = \frac{B\,O}{C\,O} = \frac{O\,P}{O'\,P}.$$

Folglich

$$\frac{A\,O}{B\,O} = \frac{B\,O}{C\,O} = \frac{C\,O}{D\,O} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot = \frac{O\,P}{O'\,P}$$

[1]) Fritz Erens, Eine analytische und graphische Methode zur Berechnung von Anfahr- und Bremswiderständen für elektrische Eisenbahnen. Siehe ETZ 1899, S. 277.

Digitized by Google

bezw. da $AO = n_1$, $BO = n_2$ usw.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{n_2}{n_3} = \frac{n_3}{n_4} \cdots \cdots = \frac{OP}{O'P}.$$

Gl. 167 wird also durch die angegebene Konstruktion erfüllt.

Für Hauptstrommotoren gestaltet sich die Bestimmung der Regulierwiderstände insofern viel schwieriger, als hier das Feld und der Ankerstrom sich beide gleichzeitig ändern. Außerdem wird durch die Regulierung der Widerstand des Motors verändert und dadurch der Spannungsabfall im Motor beeinflußt.

Eine direkte Vorausberechnung dieser Regulierwiderstände ist daher überhaupt nur in dem Falle möglich, daß für ein gegebenes Drehmoment eine bestimmte Geschwindigkeitserhöhung gefordert wird, wie dies z. B. bei elektrischen Bahnen vorkommt. Für dieses Drehmoment ϑ und die gegebene Tourenzahl n_1, auf welche der Motor gebracht werden soll, erhält man die Energiegleichung

$$PJ_a - J_a^2(R_a + R_h) = \frac{2\pi \cdot 9{,}81}{60} n_1 \vartheta.$$

Hierbei ist die Änderung des Motorwiderstandes durch den Nebenschluß zur Feldwicklung vernachlässigt, da sie auf das Resultat wenig Einfluß hat. Aus der angegebenen Gleichung kann die zur Herstellung des Drehmomentes ϑ bei der Tourenzahl n_1 notwendige Ankerstromstärke berechnet werden.

Der hierbei notwendige Kraftfluß Φ ergibt sich dann zu

$$\Phi = \frac{P - J_a(R_a + R_h)}{\frac{N}{a} \cdot \frac{p n_1}{60} 10^{-8}} = \frac{a}{p} \frac{2\pi \cdot 9{,}81 \cdot 10^8}{N} \frac{\vartheta}{J_a}.$$

Man entnimmt nun der Magnetisierungskurve der Maschine, indem man den Einfluß der Ankerrückwirkung vernachlässigt, den zum Kraftfluß Φ gehörigen Wert der Erregerstromstärke J_e und erhält den zur Erhöhung der Tourenzahl auf den Wert n_1 erforderlichen Widerstand der Nebenschließung

$$R_n = \frac{R_h J_e}{J_a - J_e}.$$

Digitized by Google

Zwanzigstes Kapitel.

88. Die Bemessung von Metallwiderständen. — 89. Flüssigkeitswiderstände.

88. Die Bemessung von Metallwiderständen.

Für die Entscheidung über das für Anlaß- und Regulierwiderstände zu verwendende Material wird vor allem billige Herstellung und geringer Raumbedarf dieser Apparate und außerdem noch die Dauerhaftigkeit und der Temperaturkoeffizient des betreffenden Metalls ausschlaggebend sein. Die Herstellungskosten der Widerstandsapparate werden außer von der Menge des verwandten Widerstandsmaterials wesentlich durch das Gehäuse und das sonstige Zubehör bedingt. Im allgemeinen werden die Kosten unter sonst gleichen Umständen um so geringer werden, je kompendiöser man die Vorrichtung gestaltet. Nun hängt der Raum, welchen die Widerstandsdrähte einnehmen, wesentlich von ihrer Länge ab; man wird sich daher bemühen, diese möglichst zu reduzieren. Eine für gleiche Erwärmung durchgeführte Berechnung zeigt, daß die Länge des notwendigen Widerstandsmaterials um so kleiner wird, je kleiner seine spezifische Leitfähigkeit ist. Man wählt daher für Widerstandsapparate stets Materialien mit möglichst hohem spezifischen Widerstand. Hauptsächlich sind in Gebrauch Eisen und eine Anzahl Legierungen, welche speziell für diese Zwecke hergestellt werden, wie Nickelin, Kruppin, Manganstahl, Platinoid, Neusilber usw.

Tabelle VIII, S. 438 gibt den spezifischen Widerstand ϱ, die spezifische Wärme c, und das spezifische Gewicht γ dieser Materialien. Der Temperaturkoeffizient ist bei den meisten so klein, daß er praktisch gleich Null gesetzt werden kann. Ein geringer Temperaturkoeffizient ist namentlich für Regulierwiderstände von Bedeutung, da es hier wünschenswert ist, daß der Widerstand, nachdem er einmal eingestellt, möglichst konstant bleibt und nicht etwa, wenn man durch die Regulierung den Strom im Apparat geändert hat, allmählich einen andern Wert annimmt.

Digitized by Google

Tabelle VIII.

Material	Spez. Widerstand ϱ m/mm²	Spez. Wärme c	Spez. Gewicht γ	A	B
Konstantan . . .	0,50	0,10	8,8	16,5	3,35
Kruppin	0,85	0,12	8,1	18	6,2
Eisen	ca. 0,13	0,11	ca. 7,8	16	0,95
Manganin	0,42	—	—	—	—
Manganstahl . .	0,68	—	—	—	—
Neusilber	0,3—0,4	0,095	8,5	15	2,2—2,9
Nickelin I (hart) .	0,43	0,095	8,9	16	3,15
Nickelin II . . .	0,33	0,095	8,1	14,5	2,4
Platinoid	0,47	—	—	—	—
Rheotan	1,00	—	—	—	—

Die Dimensionierung der Widerstände für ein gegebenes Widerstandsmaterial, d. h. die Festsetzung von Querschnitt und Länge, wird bedingt durch die zulässige Erwärmung; durch diese wird der Querschnitt des Drahtes für die maximale Stromstärke, welche natürlich stets gegeben sein muß, und hiermit auch die zu verwendende Länge bestimmt. Vor allem ist hierbei zu unterscheiden zwischen Widerständen für dauernde Einschaltung und solchen, welche nur periodisch für kurze Zeit benutzt werden.

Wird ein Widerstand dauernd von Strom durchflossen, so wird ein Gleichgewichtszustand und konstante Temperatur eintreten, wenn die von der Drahtoberfläche pro Zeiteinheit abgegebene Wärmemenge gleich dem zugeführten Effekt geworden ist:

$$10 \cdot \alpha \cdot L\,U T = 0{,}24\, J^2 \frac{L}{q} \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (168)$$

α = Wärmeabgabekoeffizient, d. h. die in 1 Sekunde pro cm² Oberfläche und 1 Grad Temperaturunterschied abgegebene Wärmemenge in gr. cal.
L = Gesamtlänge des Drahtes in m.
U = Umfang des Drahtes in mm.
q = Querschnitt in mm².
T = Temperaturerhöhung in Grad C.

Die zulässige Stromdichte $j = \frac{J}{q}$ ergibt sich aus dieser Formel zu

$$j = \sqrt{\frac{10\,k\,T}{0{,}24 \cdot \varrho}} \sqrt{\frac{U}{q}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (169)$$

Digitized by Google

Diese wird also um so größer, je größer das Verhältnis $\frac{U}{q}$ wird.

Man wird daher das Material am besten ausnutzen können, wenn man die Widerstände in Bandform ausführt, da für langgestreckten rechteckigen Querschnitt $\frac{U}{q}$ am größten wird. Namentlich sind auch Bänder aus Drahtgaze in dieser Hinsicht günstig.

Für Drähte mit kreisförmigem Querschnitt erhalten wir

$$j = \sqrt{\frac{40\,h\,T}{0{,}24\cdot\varrho}}\sqrt{\frac{1}{D}} \quad \ldots\ldots \quad (170)$$

oder

$$J = K\sqrt{D^3} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (171)$$

und

$$K = 10\sqrt{h}\sqrt{\frac{T}{\varrho}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (172)$$

Aus Gl. 169 geht hervor, daß für eine bestimmte Querschnittsform die zulässige Stromdichte um so kleiner ist, je größer der Querschnitt ist.

Der Koeffizient der Wärmeabgabe h hängt vor allem von der Art und Weise ab, wie die Drähte oder Bänder angeordnet und eingebaut sind. Sind die Widerstände in Kasten eingesetzt, so ist die Anzahl Watt, welche sie aufnehmen können, wesentlich durch die Kastenoberfläche bedingt. Ingenieur J. Klöckner, Köln, dimensioniert die Kasten seiner Regulierwiderstände, welche seitlich mit Luftschlitzen versehen sind, so, daß auf $^1/_3$ Watt 1 cm² Kühlfläche kommt. Sind die Widerstände gänzlich eingeschlossen, so daß keine Luftzirkulation stattfinden kann, so muß man natürlich bedeutend unter diesem Wert bleiben.

Ferner ist die gegenseitige Lage der Drähte oder Bänder und speziell für Drahtwiderstände die Art und Weise, wie die Spiralen gewickelt sind, von Einfluß auf die Wärmeabgabekoeffizienten. Als günstigster Abstand zweier Spiralgänge ist verschiedentlich experimentell der doppelte Drahtdurchmesser festgestellt worden; als Spiraldurchmesser wählt man nach Versuchen von V. Zingler[1]) am zweckmäßigsten:

Drahtdurchmesser	Dorndurchmesser
1 mm	$^3/_8$"
1 —1,5 mm	$^1/_2$"
1,5—2,0 „	$^1/_2$"—$^3/_4$"
2,0—2,5 „	$^3/_4$"—$^7/_8$"
2,5—3,5 „	$^7/_8$"

[1]) The Electrical Review. Bd. 41, S. 396.

Digitized by Google

Der Koeffizient der Wärmeabgabe ist, wie aus dem Vorhergehenden erhellt, keine Konstante; die zulässige Materialbeanspruchung muß daher für jede Widerstandstype experimentell festgestellt werden.

Nach Versuchen von Erlacher[1]) kann man für runden Querschnitt setzen

bei ausgezeichneter Ventilation $K = 0{,}41 \sqrt{\frac{T}{\varrho}}$ . . . . . (173)

und bei schlechter Ventilation $K = 0{,}37 \sqrt{\frac{T}{\varrho}}$ . . . . . (174)

Die zulässige Temperaturerhöhung T ist bedingt durch Art und Ort der Aufstellung des Widerstands, durch das Material, aus dem die einzelnen Teile des Apparates bestehen, und vor allem durch dessen konstruktiven Aufbau. Von Wichtigkeit ist dabei namentlich, ob die Widerstände aus frei gespannten Spiralen oder Bändern bestehen, oder ob dieselben auf gerillten Porzellanzylindern oder sonst irgendwie so befestigt sind, daß die gegenseitige Lage der Drähte gesichert ist.

Erlacher gibt folgende zulässige Temperaturen an: für einfache Anlasser mit dem Widerstand auf Porzellanzylinder gewickelt bis 450° C, mit dem Widerstand in Spiralen gewickelt bis 300° C; für Umkehranlasser und Geschwindigkeitsregler im Hauptkreis mit dem Widerstand auf Porzellanzylindern bis 300° C, mit dem Widerstand in Spiralen 200° C; für Nebenschlußregulatoren allgemein 100° C.

Bei Widerständen für kurze Dauer der Belastung kommt außer den genannten Gesichtspunkten hauptsächlich die Wärmeaufnahme des Widerstandsmaterials und seiner nächsten Umgebung in Betracht. Hier werden also Widerstände mit großer Wärmekapazität von Vorteil sein. Man wickelt deshalb zweckmäßig die Spulen auf Porzellanzylinder oder bettet das Widerstandsmaterial in eine Emailschicht ein, welche auf eine gerippte Eisenplatte aufgebracht ist.

Namentlich diese letzteren gestatten eine vorzügliche Ausnützung des Materials. Nach Angaben von Dr. M. Levy[2]) kann man erreichen

für Anlaßwiderstände 4—5 Watt pro cm² Plattenfläche
„ Dauerbelastung ca. 1 „ „ „ „

Zur Erhöhung der Wärmekapazität werden die Widerstandsrahmen in manchen Fällen auch in Öl eingetaucht, wodurch

[1]) ETZ 1902, S. 405.
[2]) ETZ 1899, S. 677.

Digitized by Google

ebenfalls eine bedeutend höhere Belastungsfähigkeit für kurze Belastungsdauer erreicht wird.

Wie wir im Bd. I, S. 732 erörtert haben, wird die Temperaturerhöhung t eines Körpers z sec nach Anfang der Wärmeerzeugung durch die Gleichung

$$t = T\left(1 - \varepsilon^{-\frac{z}{Z}}\right) \quad \ldots \ldots \quad (175)$$

gegeben. Es ist T die höchste erst nach einer unendlichen Zeit erreichbare Temperatur und Z die Zeitkonstante. Letztere stellt die Zeit dar, in welcher der Körper sich um T^0 erwärmen würde, wenn keine Wärmeabgabe stattfände. In Fig. 396 ist $f(t, z)$ aufgetragen, und zwar ist der Maßstab dieser Kurve so gewählt, daß $T = 1$ und $Z = 1$ genommen ist. Sind Z und T bekannt, so ist aus dieser Kurve leicht die Temperaturerhöhung nach einer bestimmten Zeit zu finden. Ist z. B. $Z = 4$ sec und $T = 100^0$, so finden wir, daß nach einer Zeit $0{,}5\,Z = 2$ sec die Temperaturerhöhung rund $0{,}4\,T = 40^0$ C ist. Nach einer Zeit $z = Z$ wird die Temperaturerhöhung allgemein rund $0{,}63\,T^0$.

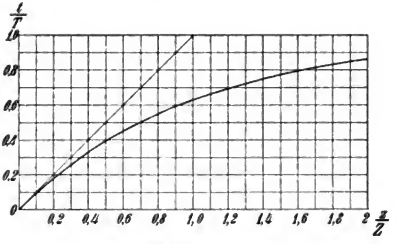


Fig. 396.

Die Kurve ist somit leicht zu benützen, wenn man Z und T kennt. Für Widerstandsdrähte von rundem Querschnitt, deren Wärmekapazität nicht künstlich erhöht ist, läßt sich für Z und T eine einfache Formel ableiten.

Nach Bd. I, S. 732 ist

$$Z = \frac{cGT}{Q} \text{ sec.}$$

Setzt man

$$Q = 0{,}24\,J^2 R = 0{,}24 \cdot J^2 \frac{L}{q} \varrho$$

und

$$G = Lq\gamma,$$

Digitized by Google

so wird

$$Z = \frac{c\gamma}{0{,}24\,\varrho}\left(\frac{q}{J}\right)^2 T \quad \ldots\ldots\ldots \quad (176)$$

Weiter ist nach Gl. 171 und 174

$$J = 0{,}37\sqrt{\frac{T}{\varrho}}\sqrt{D^3}.$$

Hieraus folgt

$$\left(\frac{q}{J}\right)^2 = \frac{\pi^2}{16\cdot 0{,}37^2}\,\frac{\varrho}{T}\,D \quad \ldots\ldots\ldots \quad (177)$$

Setzt man diesen Wert von $\left(\frac{q}{J}\right)^2$ in die Gl. 176 ein, so erhält man

$$Z = \frac{c\gamma\pi^2}{16\cdot 0{,}24\cdot 0{,}37^2}\,D = AD \quad \ldots\ldots\ldots \quad (178)$$

Aus Gl. 174 erhält man weiter

$$T = \frac{\varrho}{0{,}37^2}K^2 = BK^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (179)$$

Die Konstanten A und B sind in die Tabelle VIII, S. 438 eingetragen.

Ein Beispiel möge den Berechnungsgang erläutern. Es wird gefragt: wie lange darf man eine Nickelinspirale (Qual. II) von 4 mm Drahtdurchmesser mit 100 Amp. belasten, ohne daß die Temperaturerhöhung 100° C überschreitet.

Aus der Gleichung:

$$J = K\sqrt{D^3} \qquad 100 = K\sqrt{4^3}$$

finden wir $K = 12{,}5$ und somit

$$T = BK^2 = 2{,}4\cdot 12{,}5^2 = 375^\circ\,\mathrm{C},$$

$$Z = AD = 14{,}5\cdot 4 = 58\ \mathrm{sec}.$$

Es ist $100^\circ\,\mathrm{C} = 0{,}267\cdot 375 = 0{,}267\,T$. Diese Temperatur wird erreicht nach einer Zeit (aus Kurve Fig. 396) $z = 0{,}32\cdot Z = 0{,}32\cdot 58 = 18{,}5$ sec.

Im allgemeinen läßt sich diese Zeit nicht so leicht bestimmen. Auch wird man nach der abgeleiteten Methode nur annähernd richtige Werte bekommen, da die Abkühlung nicht nur vom Drahtdurchmesser, sondern auch vom Spiraldurchmesser und von der Größe des Kastens abhängig ist. Man wird somit nur dann richtige Resultate erhalten, wenn man die Kurve $f(t, z)$ an dem fertigen Apparat experimentell aufnimmt.

Wir wollen jetzt noch die Frage erörtern, wie sich bei Anlassern mit frei tragenden Spiralen das Gewicht des Widerstandes pro PS

Digitized by Google

mit der Leistung und der Stromstärke ändert. Wir können hier natürlich nur solche Anlasser vergleichen, die gleichartig, d. h. mit gleicher Beanspruchung und Abstufung gebaut sind.

Wir nehmen an, daß die Gleichung

$$J = K\sqrt{D^3}$$

Giltigkeit hat. Es wird dann

$$D = \left(\frac{J}{K}\right)^{\frac{2}{3}}; \qquad q = \frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi}{4}\left(\frac{J}{K}\right)^{\frac{4}{3}};$$

$$R = \frac{L}{q}\varrho; \qquad G = Lq\gamma; \qquad G = Rq^2\frac{\varrho}{\gamma};$$

$$R = \frac{P}{J}$$

und somit

$$G = \frac{P}{J}\left(\frac{\pi}{4}\right)^2\left(\frac{J}{K}\right)^{\frac{8}{3}}\cdot\frac{\varrho}{\gamma} = \left[\left(\frac{\pi}{4}\right)^2\left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{8}{3}}\frac{\varrho}{\gamma}\right]PJ^{\frac{5}{3}} = CPJ^{\frac{5}{3}}.$$

Es wird somit

$$\frac{G}{PS} = C_1 J^{\frac{2}{3}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (180)$$

Hieraus geht hervor, daß bei gleichbleibender Leistung das Gewicht pro PS um so kleiner ist, je höher die Spannung ist, und daß ferner bei zunehmender Leistung und gleichbleibender Spannung das Gewicht pro PS abnimmt.

Dr. Martin Kallmann beschreibt in der ETZ 1907, S. 495 einen neuen Anlaßwiderstand für kleinere Motoren. Dieser beruht auf der Eigenschaft des Eisens, bei Rotglut einen bis etwa achtmal so großen Widerstand zu haben, wie in kaltem Zustande. Als Widerstandselemente verwendet er Eisendrähte oder -bänder, welche in eine mit Wasserstoff von bestimmtem Druck gefüllte Glocke eingeschlossen sind. Ein solches Element wird als Variator bezeichnet. Wasserstoff wird deshalb gewählt, weil er das Eisen vor Verbrennen schützt und zugleich die Wärme gut leitet.

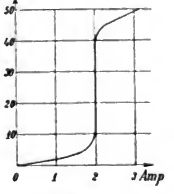


Fig. 397.

Fig. 397 zeigt für einen Variator die Abhängigkeit der Spannung von der Stromstärke. Bei der Verwendung des Variators als Anlaßwiderstand wird er durch Zuführung eines großen Stromes in sehr kurzer Zeit (weniger als 0,25 sec) in Rotglut gebracht, wobei

Digitized by Google

er seinen großen Widerstand annimmt. Hierbei darf der Anker mit dem Variator in Reihe geschaltet sein, da der Stromstoß so kurz dauert, daß der Anker nicht gefährdet wird. Der Motor läuft jetzt mit großem vorgeschaltetem Widerstand an. Es sinkt hierbei die Spannung an den Widerstandsklemmen und der Variator reguliert die Stromaufnahme nach Fig. 397 ein, wobei die Stromstärke über einem großen Bereich nahezu konstant bleibt.

In der Praxis werden zwei Variatoren mit einem gewöhnlichen Widerstand hintereinander geschaltet. Auf der ersten Schaltstufe wird diese Kombination mit dem Anker in Reihe auf das Netz geschaltet, auf der zweiten Stufe wird ein Variator und der Widerstand abgeschaltet, während auf der dritten Stufe der zweite Variator abgeschaltet wird.

89. Flüssigkeitswiderstände.

Zum Anlassen größerer Motoren verwendet man häufig Flüssigkeitswiderstände. Dieselben bestehen meist aus einem eisernen Trog, welcher mit Schwefelsäure-, Kochsalz-, Soda- oder Pottaschelösung gefüllt ist, und in den eine Elektrode, welche meist aus Eisen besteht, allmählich eingetaucht werden kann; als zweite Elektrode dient die Gefäßwand. Nachdem der Motor die volle Tourenzahl erreicht hat, werden die beiden Elektroden kurzgeschlossen.

Der Widerstand des Apparates ist von der Zusammensetzung der Flüssigkeit, von der eingetauchten Elektrodenfläche und von der Entfernung der beiden Elektroden abhängig; er kann durch Änderung der Sättigung der Flüssigkeit in weiten Grenzen geändert werden. Die Elektroden-Dimensionen und das Sättigungsverhältnis, welche den richtigen Widerstand ergeben, sind durch Versuche festzustellen.[1]) Zu beachten ist, daß ein einmal eingestellter Widerstand sich durch elektrolytische Wirkungen stark ändern kann.

In der Möglichkeit, den Widerstand durch allmähliches Eintauchen der einen Elektrode vollständig gleichmäßig zu ändern, besteht der Vorteil der Apparate.

Auch zu Versuchszwecken finden Flüssigkeitswiderstände als Ballastwiderstände Anwendung. Man wählt hierbei die Stromdichte an den Elektroden zu 0,3—0,4 Amp./cm² und eine Flüssigkeitsmenge von 7 l für ein aufzunehmendes KW.

[1]) Siehe auch Dr. F. Niethammer, Über Flüssigkeitsanlasser. Z. f. E. 1904, S. 35.

Digitized by Google

Einundzwanzigstes Kapitel.

90. Das Ausschalten der Erregerwicklung. — 91. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren. — 92. Widerstandsapparate für Motoren ohne Umkehrung der Drehrichtung. — 93. Widerstandsapparate für Motoren mit Umkehrung der Drehrichtung.

90. Das Ausschalten der Erregerwicklung.

Was die Art, wie die Anlaß- und Regulierwiderstände miteinander und mit den Maschinen, zu welchen sie gehören, zu verbinden sind, betrifft, so gibt hier hauptsächlich ein Punkt zu besonderen Bemerkungen Anlaß. Es ist dies die Anordnung der Schaltung mit Rücksicht auf das Ausschalten der Erregerwicklung bei Nebenschlußmaschinen.

Wird bei einer größeren Maschine mit vielen Feldwindungen diese plötzlich vollständig abgeschaltet, so daß der Strom in sehr kurzer Zeit von seiner normalen Stärke auf Null zurückgehen muß, so kann die entstehende hohe Selbstinduktionsspannung $L \cdot \frac{di}{dt}$ ein Durchschlagen der Isolation veranlassen. Um dieser Gefahr zu begegnen, kann man verschiedene Wege einschlagen.

Man gebraucht z. B. einen Ausschalter mit zwei Kohlenkontakten und zieht, indem man diese langsam voneinander entfernt, einen Lichtbogen, in welchem die Feldenergie vernichtet wird. Dieser Ausschalter kann mit dem Organe, das den Regulierwiderstand einstellt, z. B. einer Kurbel mit Schneckengetriebe derart verbunden werden, daß beim Drehen der Kurbel, nachdem der ganze Widerstand vorgeschaltet ist, zuletzt die beiden Kohlen auseinander gezogen werden.

Ferner werden mit Rücksicht auf diesen Punkt in vielen Fällen besondere Anordnungen der Schaltung angewandt. Es werden entweder Widerstände vorgesehen, welche vor Unterbrechung des Erregerkreises vor die Feldwicklung geschaltet werden, um die Stromstärke zu verringern, oder man setzt die Energie des verschwindenden Feldes irgendwie in Stromwärme um. Dies kann

Digitized by Google

in der Erregerwicklung selbst geschehen, indem sie in sich geschlossen wird, oder es kann hierfür ein besonderer Stromkreis angewendet werden, indem man z. B. unter den Erregerspulen direkt auf dem Magnetkern eine Hülse aus Kupferblech anordnet oder eine etwa vorhandene Hauptschlußwicklung vor dem Abschalten der Nebenschlußwicklung in sich kurzschließt.

Fig. 398 bis 401 zeigen einige besondere Schaltungen zur Abschaltung der Erregung.

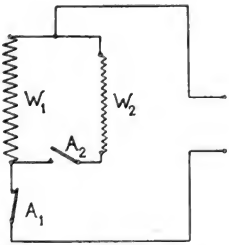


Fig. 398.
Ausschalter der Erregerwicklung.

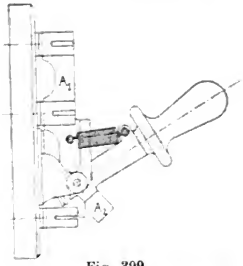


Fig. 399.
Schalter zu Schema Fig. 398.

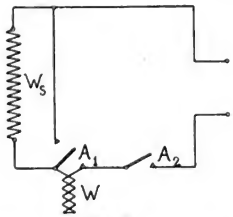


Fig. 400.
Ausschalter der Erregerwicklung.

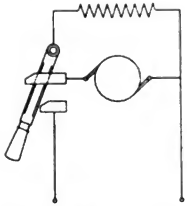


Fig. 401.
Schalter der General Electric Co.

Nach der Anordnung Fig. 398[1]) wird kurz vor dem Abschalten parallel zur Erregerwicklung W_1 ein induktionsfreier Widerstand W_2 geschaltet. Die Schalter A_1 und A_2 werden dabei derart an einem Handgriff vereinigt (Fig. 399), daß Schalter A_1 durch eine hierauf eingestellte Feder in dem Augenblick zum Ausschnappen gebracht wird, in welchem Schalter A_2 geschlossen ist.

[1]) Hermann Müller, Vorrichtung zum Ausschalten von Widerständen mit hoher Selbstinduktion. ETZ 1894, S. 136.

Digitized by Google

Nach der Anordnung Fig. 400[1]) schaltet man vor die Erregerwicklung erst einen induktionsfreien Widerstand W, schließt sie dann kurz und schaltet ab. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß der auszuschaltende Strom kleiner wird als bei der ersten Schaltung.

Die General Electric Comp.[2]) (Fig. 401) baut ihre Schalter für Motoren so, daß beim Abschalten des Netzes Anker- und Magnetwicklung zunächst in sich kurzgeschlossen bleiben und bei Weiterbewegung des Schalters voneinander getrennt werden.

91. Regulierwiderstände für Nebenschlußgeneratoren.

Das Schema Fig. 402 zeigt die Schaltung eines Nebenschlußregulators.[3])

Die Erregerwicklung wird nicht abgeschaltet, sondern, wenn der Kontakthebel des Regulators auf der äußersten Stellung angelangt ist, kurzgeschlossen. Analog dem Schema Fig. 402 gestaltet sich die Schaltung, wenn die Erregung direkt an den Sammelschienen liegt; man hat sich nur in Fig. 402 den Anker wegzudenken.

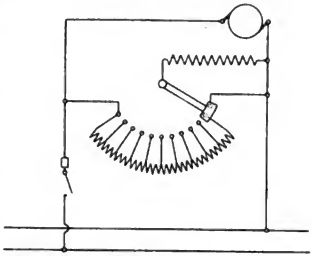


Fig. 402. Regulierwiderstand für einen Nebenschlußgenerator.

Eine feinere Regulierung läßt sich durch Anordnung von zwei Schalthebeln erreichen, welche voneinander isoliert auf derselben Achse sitzen (Fig. 403)[4]). Der Strom tritt durch den einen Hebel in die Widerstandsspiralen ein und durch den andern aus. Die Anordnung bietet dieselben

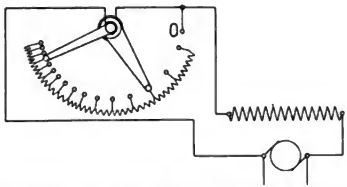


Fig. 403. Regulierwiderstand mit zwei Schalthebeln.

[1]) ETZ 1894, S. 229 (C. L. R. E. Menges).

[2]) Niethammer, Elektrische Maschinen und Anlagen. Bd. III.

[3]) Ernst Egger, Auschaltung von Widerständen mit hoher Selbstinduktion. ETZ 1894, S. 453.

[4]) Martin Kallmann, Regulierapparate für elektrische Zentralanlagen. ETZ 1894, S. 275.

Digitized by Google

Vorteile wie zwei hintereinander geschaltete Regulierwiderstände, indem zur Regulierung zwei Punkte zur Verfügung stehen und jedes Stück des Widerstandes, welches man zwischen die beiden Kontakte bringen kann, zur Einstellung benutzbar ist. Bringt man an einem Ende des Widerstandes ein paar Stufen mit feinerer Teilung an, so wird die Regulierung sehr genau und man kann außerdem noch die Zahl der Stufen verringern. Auch bei dieser Schaltung kann man nach der in der Figur angedeuteten Weise einen Kontakt 0 zum Kurzschließen der Erregerwicklung anordnen.

Weit mannigfaltiger als für Generatoren sind die Anordnungen der Schalter für Motoren. Zu den einfachen Schaltern für eine Drehrichtung kommen hier noch die Apparate für Umkehrung der Bewegung hinzu.

92. Widerstandsapparate für Motoren ohne Umkehrung der Drehrichtung.

a) Für Nebenschlußmotoren. Fig. 404[1]) zeigt einen einfachen Anlasser. Die Erregung wird hier nicht ausgeschaltet, sondern jeweils durch Anker und Anlaßwiderstand geschlossen. Hier ist jedoch im Betriebszustand der Anlasser in den Erregerkreis eingeschaltet.

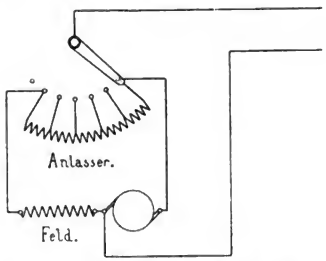


Fig. 404. Anlasserschaltung für Nebenschlußmotoren ohne Feldunterbrechung.

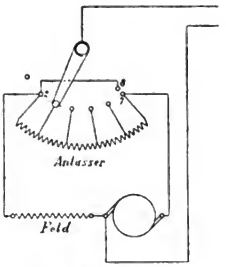


Fig. 405. Anlasser von F. Klöckner, Köln.

Dies läßt sich durch die Schaltung Fig. 405 umgehen.

Ist der Anlasser ausgeschaltet, so befindet sich der Hebel auf dem Kontaktknopf 7 und berührt zu gleicher Zeit den Knopf 8,

[1]) Fischer-Hinnen, ETZ 1898, S. 93.

Digitized by Google

durch die besondere Verbindung 2—7 wird jetzt der Feldwicklung direkt Strom zugeführt.

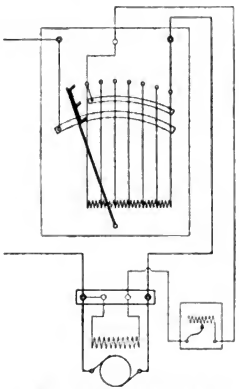


Fig. 406. Anlaßapparat für größere Stromstärken.

Will man bei größeren Stromstärken den Strom nicht durch den Drehpunkt des Kontakthebels gehen lassen, so ist noch eine weitere Schleifschiene anzubringen (Fig. 406).

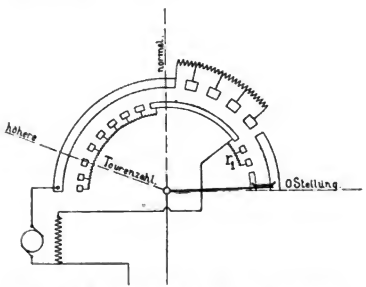


Fig. 407. Kombinierter Anlaß- und Regulierwiderstand für Nebenschlußmotoren.

Fig. 407 zeigt einen Anlasser mit Regulierwiderstand für den Erregerstrom (A. E. G. Berlin). Der Erregerstrom wird durch den Vorschaltwiderstand r_1 geschwächt, bevor die Wicklung abgeschaltet wird.

Nach der Anordnung Fig. 408 (Patent Siemens & Halske) werden die Schalter *a* und *b* automatisch vom Schalthebel betätigt, und zwar wird beim Bremsen Schalter *b* geöffnet und *a* geschlossen, während beim Anlassen *a* geöffnet und *b* geschlossen ist.

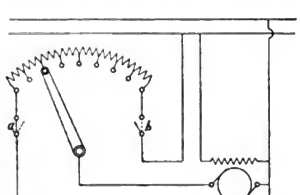


Fig. 408. Anlaß- und Bremsapparat (Patent Siemens & Halske).

Es erübrigt noch auf die Schaltungen der Anlasser, welche mit Maximal- und Minimalausschalter versehen sind, hinzuweisen.

Fig. 409 zeigt eine Ausführung von Ingenieur F. Klöckner, bei welcher der Motor automatisch abgestellt wird, sobald der

Digitized by Google

Motorstrom zu hoch oder der Nebenschlußstrom unterbrochen wird. Der Elektromagnet *A* liegt im Hauptstromkreis, während der Elektromagnet *B* sich im Nebenschlußkreis befindet. Der Schalterhebel wird derartig von einer Spiralfeder beeinflußt, daß er zurückschnappt, sobald er nicht mehr festgehalten wird. In der Laufstellung wird der Hebel durch den Elektromagneten *B* festgehalten. Wird der Nebenschlußkreis unterbrochen, so wird *B* stromlos und der Hebel schnellt zurück. Wird der Hauptstrom zu groß, so zieht *A* seinen Anker an und schaltet die Wicklung von *B* kurz, *B* wird stromlos und der Schalthebel wird auf die Nullstellung gezogen.

Fig. 410 zeigt eine Anordnung von Trudelle,[1]) bei welcher ebenfalls eine Sicherung des Motors gegen zu großen Strom und Unterbrechung des Nebenschlußkreises stattfindet.

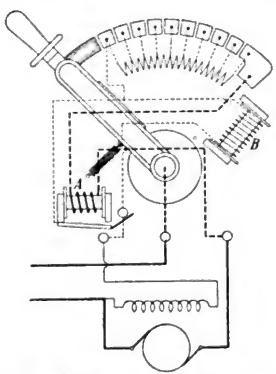


Fig. 409. Automatischer Schalter von F. Klöckner.

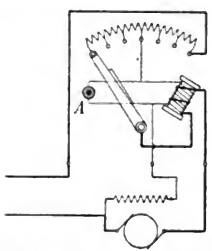


Fig. 410. Automatischer Schalter von Trudelle.

Der Elektromagnet, welcher den Hebel festhält, erhält hier eine Hauptschluß- und Nebenschlußwicklung, deren magnetisierende Wirkungen einander entgegenwirken und so gerichtet sind, daß die vom Nebenschlußstrom erzeugte Wirkung eine anziehende ist. Die Wicklungen sind so bemessen, daß wenn der Hauptstrom zu sehr anwächst, die magnetisierenden Wirkungen einander aufheben, so daß der Hebel zurückschnappt. Dies geschieht auch, sobald die Wicklung im Nebenschlußkreis stromlos wird. Um den Motor still zu setzen, braucht man nur auf den Knopf *A* zu drücken, wodurch die Wicklung im Nebenschlußkreis kurzgeschlossen und stromlos wird.

[1]) Z. f. E. 1905, S. 298.

Digitized by Google

Zum Anlassen von Aufzugsmotoren und allgemein zum Anlassen von Motoren aus der Ferne, hat man verschiedene Selbstanlasser ausgebildet. Diese lassen sich im wesentlichen einteilen in solche, bei welchen Gewichte oder Hilfsmotoren die Steuerung des Anlassers besorgen und in die sog. Relaisanlasser. Erstere bieten bezüglich der Schaltung wenig neues.

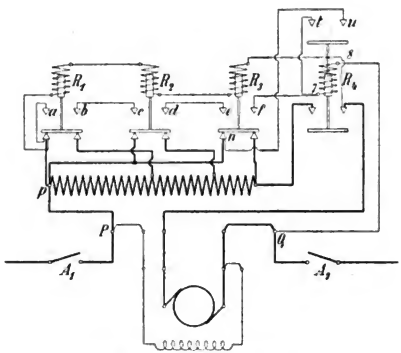


Fig. 411. Relaisanlasser.

Fig. 411[1]) stellt die Schaltung eines Relaisanlassers dar. Die Wirkungsweise dieses Anlassers ist die folgende. Schließt man die Schalter A_1 und A_2, so erhalten die Relais R_1, R_2, R_3 Strom und ziehen ihre Anker hoch; dadurch wird ein Stromkreis geschlossen, durch welchen das Relais R_4 Strom erhält (A_1, P, p, a, b, c, d, e, f, 7, 8, Q, A_2). Dieses zieht jetzt seinen Anker an und schließt den Hauptkreis des Motors, zu gleicher Zeit schließt es einen neuen Weg für den Magnetisierungsstrom des Relais R_4 (A_1, P, p, n, u, t, 7, 8, Q, A_2), so daß jetzt auch beim Herabfallen der Anker der Relais R_1, R_2 und R_3 das Relais R_4 dauernd unter Strom bleibt. Die Wicklungen der Relais R_1, R_2, R_3 liegen hintereinander an den Klemmen des Anlaßwiderstandes. Da beim Anlassen die Klemmenspannung stetig wächst, so nimmt die Spannung an den Anlaßklemmen stetig ab. Wird eine bestimmte Spannung an den Anlaßklemmen unterschritten, so läßt das Relais R_1 seinen Anker fallen und schließt dadurch die erste Widerstandsstufe kurz. Sinkt die Spannung an

[1]) J. Jessen, Ein neuer Selbstanlasser. ETZ 1905, S. 809.

Digitized by Google

den Anlaßklemmen noch mehr, so läßt R_2 und schließlich auch R_3 seinen Anker fallen, so daß am Ende der ganze Widerstand kurzgeschlossen ist. Beim Abstellen des Motors öffnet man die Schalter A_1 und A_2; der Anker des Relais R_4 fällt herunter und die Relais sind wieder zum Anlassen bereit.

b) Für Hauptschlußmotoren. Fig. 412 zeigt einen Anlasser mit selbsttätiger Ausschaltung für Hauptschlußmotoren. Der Anlasserhebel A wird hier entgegen der Federkraft, die ihn in die Nullstellung zu ziehen sucht, durch einen in ein Sperrad eingreifenden Zahn des Hebels H festgehalten. Wird der Strom ausgeschaltet, so läßt der Magnet M den Hebel H los und der Zahn wird durch die Feder F aus dem Sperrad herausgezogen, so daß der Schalter in die Nullstellung zurückschnellt. Wird der Strom zu stark, so schließt der Hebel K einen Teil der Wicklung von M kurz, so daß die Feder F zur Wirkung kommt und der Anlaßhebel losgelassen wird.

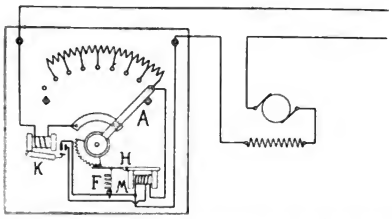


Fig. 412. Anlasser mit selbsttätiger Ausschaltung für Hauptschlußmotoren.

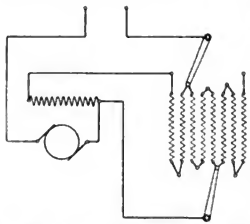


Fig. 413. Vereinigung von Vorschalt- und Regulierwiderstand bei Hauptschlußmotoren.

Von Schaltungen für Hauptstrommotoren hat noch Fig. 413[1]) Interesse. Der gleiche Widerstand dient als Vorschaltwiderstand und Magnetregulator. Die beiden Hebel können beliebige Stellungen annehmen. Ist ein Kontroller vorhanden, so legt man natürlich die Verbindungen so, daß Vor-

[1]) Niethammer, Elektrisch betriebene Hebezeuge, S. 209.

Digitized by Google

schalt- und Regulierwiderstand durch denselben Schalthebel betätigt werden; dann wird jeweils unter der normalen Tourenzahl der

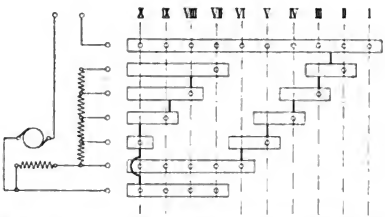


Fig. 414. Kontrollerschema für Schaltung Fig. 413.

Widerstand als Vorschaltwiderstand und über der normalen als Nebenschluß benutzt. Fig. 414 gibt das Kontrollerschema für diese Schaltung.

93. Widerstandsapparate für Motoren mit Umkehrung der Drehrichtung.

a) Für Nebenschlußmotoren. Die Apparate zur Änderung der Drehrichtung von Nebenschlußmotoren arbeiten alle mit Stromumkehr im Anker; die Umschaltung wird daher stets am Anlasser vorgenommen (Wendeanlasser, Umkehranlaßwiderstände).

Wir können 3 Hauptgruppen unterscheiden:

I. Die Erregung liegt direkt am Netz ohne Verbindung mit der Umkehrschaltung und bleibt daher bei der Umsteuerung des Motors stets unter voller Spannung.

II. Die Erregung wird zugleich mit dem Anker vom Netz abgeschaltet; Anker und Anlaßwiderstand dienen als Ausgleichkreis.

III. Die Erregung wird abgeschaltet. Diese Methode wird nur da angewandt, wo besondere Anordnungen getroffen sind, um das Abschalten funkenfrei zu gestalten, z. B. wenn die Motoren mit einer Kompoundanlaßwicklung versehen sind. Man kann hier das Abschalten der Nebenschlußwicklung funkenfrei machen, indem man die Hauptschlußwicklung vorher in sich kurzschließt.

Für die Schaltungsart I gibt Fig. 415 ein Schaltungsschema. Zum Umkehren der Drehrichtung, z. B. zum Übergang von Linksgang zu Rechtsgang, wird der Schalthebel von der Laufstellung links langsam in die Laufstellung rechts gedreht. Hierdurch wird

Digitized by Google

zuerst der Anlaßwiderstand vor den Motor geschaltet, so daß die Tourenzahl sinkt. Dann gelangt der Hebel in die Bremsstellung, in welcher der Anker über den halben Anlaßwiderstand in sich geschlossen ist. Nachdem der Motor durch die Bremsung zum Stillstand gebracht ist, wird der Hebel weitergedreht, so daß er in die Anlaßstellung für Rechtsgang kommt, in welcher der Strom über den Anlaßwiderstand in umgekehrter Richtung wie bei Linksgang durch den Anker fließt. Hierauf wird der Anlaßwiderstand allmählich ausgeschaltet, bis der Hebel in die Laufstellung für Rechtsgang gelangt ist.

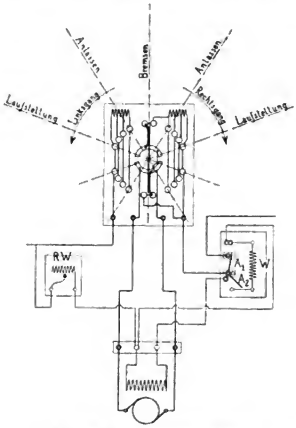


Fig. 415. Umkehranlasser.

Zum Ausschalten wird der Hebel in die Bremsstellung gedreht, wodurch der Anker vom Netz abgetrennt wird; falls er vollständig abgeschaltet werden soll, wird auch die Erregung durch den Schalter A_1 A_2, der nach dem Müller'schen System, Fig. 398 und 399, S. 446 ausgeführt ist, unterbrochen.

Für diese Anordnung der Anlaßapparate spricht die Einfachheit des Schalters. Ferner wird dadurch, daß die Erregung stets

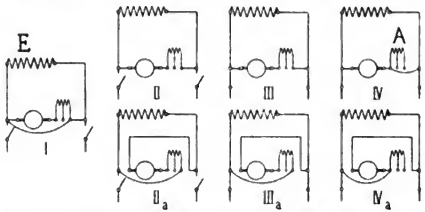


Fig. 416. Schaltstufen zur Umsteuerung eines Nebenschlußmotors.

voll eingeschaltet ist, beim Einschalten des Ankerstroms sofort ein starkes Drehmoment ausgeübt und außerdem beim Schließen des Ankers über den Anlaßwiderstand eine kräftige Bremsung ermöglicht.

Digitized by Google

Auf der andern Seite erfordert die Anordnung einen besonders konstruierten Ausschalter für die Erregung, und der Stromverbrauch wird dadurch, daß die Erregung stets eingeschaltet ist, etwas vergrößert; dies dürfte jedoch bei den Betrieben, für welche Umkehranlasser Verwendung finden, als nachteilig kaum in Betracht kommen.

Ein Beispiel für die Schaltungsart II geben die Fig. 416 und 417.

In Fig. 416 sind die verschiedenen Schaltstufen schematisch dargestellt, während Fig. 417 den zugehörigen Schalter zeigt.

Es ergeben sich hier folgende Schaltstufen:

IV und IVa. Laufstellung. Anlasser *A* ausgeschaltet.

III und IIIa. Anlaßstellung. Anlasser vorgeschaltet.

II und IIa. Ausschaltstellung. Motor vom Netz abgeschaltet. Erregerwicklung durch Anker und Anlaßwiderstand kurzgeschlossen.

I. Bremsstellung. Anker über den Anlaßwiderstand kurzgeschlossen.

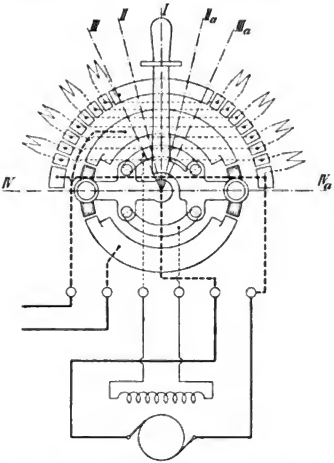


Fig. 417. Umkehranlasser von F. Klöckner, Köln.

Hier wird also die Erregerwicklung *E* beim Ausschalten gleichzeitig mit dem Anker vom Netz abgetrennt. Infolge davon ist die Bremswirkung schwächer wie bei der vorbeschriebenen Schaltung, da die Maschine sich selbst nur schwach erregt; andererseits ist allerdings auch eine Beschädigung des Motors durch zu starkes Anwachsen des Bremsstroms hier nicht zu befürchten. Ferner wird die Anzugskraft direkt nach dem Einschalten etwas geringer, als bei der erstbeschriebenen Umsteuervorrichtung, da der Erregerstrom infolge der großen Selbstinduktion der Feldwicklung nicht sofort seinen vollen Wert annimmt. Die Umkehr der Drehrichtung wird daher hier etwas mehr Zeit in Anspruch nehmen, als bei der erstbeschriebenen Anordnung.

Digitized by Google

Fig. 418 gibt ein Bild der Schaltstufen eines Umkehranlassers der Gruppe III für einen Motor mit Kompoundanlaßwicklung. Hier wird eine große Anzugskraft und starke Bremswirkung erzielt, ohne daß der Nebenschluß ständig eingeschaltet bleibt. Der Widerstand *W* wird der Magnetwicklung *F* nur vorgeschaltet, um den Öffnungsfunken beim Abschalten zu schwächen; das Kurzschließen

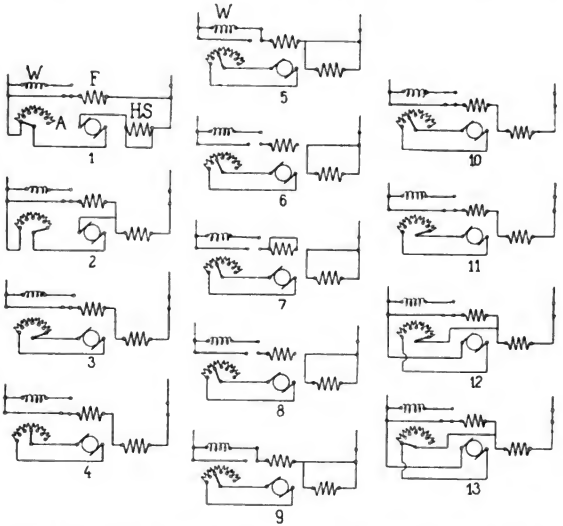


Fig. 418. Schaltstufen zur Umsteuerung eines Nebenschlußmotors mit Kompoundanlaßwicklung.

der Hauptstromwicklung (*HS*) scheint demnach den Öffnungsfunken nicht vollständig und sicher genug zu beseitigen. Die in der Figur dargestellten Schaltstufen sind folgende:

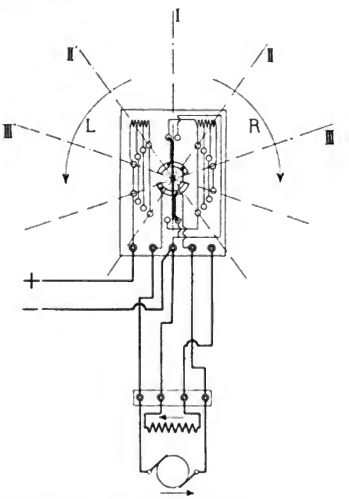
1. Laufstellung. Hauptschlußwicklung kurzgeschlossen.
2. Hauptschlußwicklung eingeschaltet. Anlasser vorgeschaltet.
3. Bremsstellung. Anker über den Anlaßwiderstand geschlossen.
4. Teil des Anlaßwiderstandes ausgeschaltet. Stärkere Bremswirkung.

Digitized by Google

5. Hauptschlußwicklung kurzgeschlossen. Widerstand W vorgeschaltet.
6. Erregerwicklung abgeschaltet.
7. Erregerwicklung kurzgeschlossen.

8, 9, 10, 11 wie 6, 5, 4, 3.

12. Umkehrung der Drehrichtung. Anlaßwiderstand vorgeschaltet.
13. Anlaßwiderstand abgeschaltet. Hauptschlußwicklung kurzgeschlossen. Laufstellung.



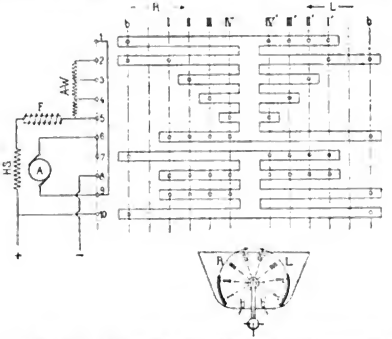
R = Rechtsgang.
L = Linksgang.
I = Bremsstellung.
II, II′ = Anlaufstellung.
III, III′ = Laufstellung.

Fig. 419. Umkehranlasser für Hauptschlußmotoren.

b) Hauptschlußmotoren. Einen Umkehranlasser für Hauptschlußmotoren zeigt Fig. 419. Die Stromrichtung wird hierbei im Anker umgekehrt, während im Feld der Strom seine Richtung beibehält. Der Anlasser ist mit Bremsschaltung für beide Drehrichtungen versehen, was ein rasches und sicheres Umschalten ermöglicht. Zu beachten ist dabei, daß die Bremsschaltung so einzurichten ist, daß die Stromrichtung im Feld unverändert bleibt. Für größere Motoren werden die Schalter als Kontroller ausgeführt; die Schaltanordnung gestaltet sich hierbei so, wie es Fig. 420 zeigt.

Digitized by Google

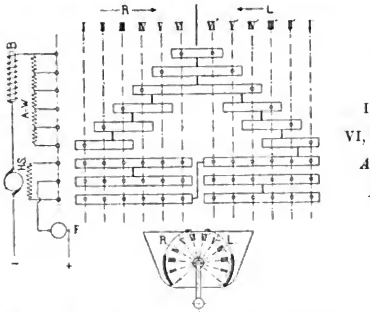
Fig. 421 zeigt einen Kontroller, bei welchem die Umkehrung der Drehrichtung durch Stromumkehr im Feld erfolgt. Eine Bremsschaltung ist nicht vorgesehen. Diese Art der Schaltung des Um-



R = Rechtsgang.
L = Linksgang.
b, b' = Bremsstellung.
I, I′ = Anlaßstellung.
IV, IV′ = Laufstellung.
A·W = Anlaßwiderstand.
F = Funkenlöschspule.
HS = Hauptschluß.
A = Anker.

Fig. 420. Kontroller für zwei Drehrichtungen (Stromumkehr im Anker).

kehranlassers hat den Vorteil, daß die maximale Spannungsdifferenz zwischen den einzelnen Kontrollerkontakten sehr gering wird, näm-



R = Rechtsgang.
L = Linksgang.
I, I′ = Anlaßstellung.
VI, VI′ = Laufstellung.
A·W = Anlaßwiderstand.
HS = Hauptschluß.
B = Bremsmagnet.
F = Funkenlöschspule.

Fig. 421. Kontroller für zwei Drehrichtungen (Stromumkehr im Feld).

lich nur gleich dem Spannungsabfall in der Hauptstromspule. Hierdurch wird die Neigung zum Überschlagen von Funken von einem Kontakt zum andern möglichst herabgesetzt. Dagegen ist ein Nach-

Digitized by Google

teil dieser Schaltung das Fehlen der elektrischen Bremswirkung; die Umsteuerung wird daher hier mehr Zeit in Anspruch nehmen.

Wird eine Umsteuervorrichtung bei Kranen angewandt, bei denen zur Bremsung ein Bremsmagnet (*B*) vorgesehen ist, so schaltet man diesen so ein, daß er bei der Umsteuerung nicht ummagnetisiert wird. Bei der Schaltung Fig. 421 ist er daher in den Ankerkreis gelegt.

Auch bei der Funkenlöschspule, welche bei den Kontrollern zum magnetischen Ausblasen der Funken angebracht wird, ist eine Ummagnetisierung während des Umsteuerns zu vermeiden. In der ersten Schaltung (Fig. 420) ist dieselbe so eingefügt, daß sie auch während der elektrischen Bremsung in Tätigkeit bleibt.

Es fällt außerhalb des Rahmens dieses Buches weiter auf die verschiedenen Schaltungen von Kontrollern einzugehen. Zum Entwurf von schwierigen Schaltungen hat R. Edler[1]) eine Schaltungstheorie ausgearbeitet, mit welcher man die verschiedenen Aufgaben lösen kann.

[1]) R. Edler, Entwurf von Schaltungen und Schaltungsapparaten.

Digitized by Google

Zweiundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren für konstante (oder annähernd konstante) Klemmenspannung bei konstanter Tourenzahl.

94. Anwendungsgebiet. — 95. Parallelschaltung von Nebenschlußgeneratoren. — 96. Parallelschaltung von Doppelschlußgeneratoren.

94. Anwendungsgebiet.

Derartige Generatoren werden allgemein für Beleuchtung, Bahnbetrieb und metallurgische Zwecke gebraucht.

Sie haben meistens Nebenschluß- oder Doppelschlußerregung, seltener Fremderregung.

Maschinen für Beleuchtung. An die Generatoren, welche Strom für Beleuchtungszwecke liefern, ist vor allem die Anforderung zu stellen, daß ihre Spannung bei Belastungsschwankungen sich möglichst wenig ändert. Es kommen daher für diesen Zweck Nebenschluß- und Doppelschlußmaschinen in Betracht.

Die Doppelschlußmaschinen haben den Vorteil, daß sie eine annähernd konstante Klemmenspannung oder, wenn sie überkompoundiert sind, eine annähernd konstante Spannung an den Speisepunkten liefern; jedoch läßt sich dieses Ziel nicht derart genau erreichen, daß man auf eine Regulierung vollständig verzichten kann. Nebenschlußmaschinen lassen sich, wie im Abschn. 96 erläutert wird, leichter parallel schalten als Doppelschlußmaschinen. Ferner haben sie einen etwas höheren Wirkungsgrad, sind in der Herstellung einfacher und billiger und ermöglichen in einfacher Weise die Verwendung einer Akkumulatorenbatterie, wodurch das Konstanthalten der Spannung erleichtert und eine gleichmäßigere Belastung der Maschine erzielt wird. Es ist daher die Verwendung von Nebenschlußmaschinen für Lichtzentralen vorzuziehen. Man bemißt sie

Digitized by Google

für geringen Spannungsabfall und die Spannung wird durch Nebenschlußregulatoren von Hand oder selbsttätig reguliert.

Gegenwärtig werden die Maschinen meistens direkt mit der Antriebsmaschine gekuppelt, wodurch an Raum gespart und größere Einfachheit und Betriebssicherheit erreicht wird. Außerdem dient der Anker des Generators als Schwungmasse, wodurch das Gewicht des Schwungrades entsprechend vermindert werden kann.

Die ganze notwendige Schwungmasse in den Anker zu legen, ist bei Gleichstromgeneratoren im allgemeinen nicht zweckmäßig [1]), weil man bei Schwungrädern, um möglichst geringes Gewicht zu erhalten, große Umfangsgeschwindigkeiten zuläßt und bei diesen Geschwindigkeiten die Generatoren schmale Anker von großem Durchmesser erhalten und daher teuer werden.

Von besonderer Wichtigkeit ist, wie erwähnt, daß die Lichtmaschinen bei Belastungsschwankungen keine zu großen Spannungsschwankungen zeigen. Man baut mit Rücksicht darauf die Maschinen mit solchen Sättigungen, daß sie bei normaler Spannung und Belastung etwas hinter dem Knie der Charakteristik arbeiten, wodurch einerseits zu großer Energieverlust in der Erregung vermieden und eine ausreichende Regulierfähigkeit gewährleistet wird und andererseits wegen des flacheren Verlaufs der Charakteristik über dem Knie, die Spannungsschwankungen bei Belastungsänderungen in zulässigen Grenzen gehalten werden.

Die Maschinen werden in der Regel selbsterregend ausgeführt. Auch wenn die Erregung an die Sammelschienen angeschlossen ist, sind die Generatoren als selbsterregend zu betrachten, da ja, abgesehen von dem geringen Spannungsverlust in den Verbindungskabeln, an den Sammelschienen dieselbe Spannung herrscht wie an den Generatorklemmen. Die zulässige Spannungsänderung bei Änderung der Belastung von Leerlauf bis Vollast (der zulässige Spannungsabfall) darf 10 bis 20% betragen. Zu hohe Anforderungen in dieser Beziehung zu stellen, ist unzweckmäßig, da die Maschine dadurch unnötig verteuert wird. Es muß dann nämlich das Verhältnis der Magnetamperewindungen zu den Ankeramperewindungen groß genommen werden, was entweder eine Vergrößerung der Abmessungen der Maschine oder eine Vergrößerung der Amperewindungen des Feldes (und somit des Aufwandes an Magnetkupfer) bedingt.

Wird die Maschine von einer besonderen, unabhängigen Stromquelle, z. B. einer Akkumulatorenbatterie aus erregt, arbeitet sie also als fremderregte Maschine, so kann man bei richtiger Be-

[1]) Siehe F. Collischonn, Gleichstrom-Schwungradmaschinen. Z. d. V. D. I. 1900, S. 211; Alexander Rothert, Sollen Dynamos als Schwungräder dienen? Z. d. V. D. I. 1901, S. 1531.

Digitized by Google

messung den Spannungsabfall auf 7 bis 10% reduzieren. Die Ursachen des Spannungsabfalls bei Fremderregung und Selbsterregung sind in Bd. I, S. 597 und 605 behandelt worden.

Maschinen für Bahnbetrieb. Die Generatoren, die für Bahnbetrieb verwendet werden, sind dadurch gekennzeichnet, daß sie sehr großen Belastungsschwankungen und plötzlichen Überlastungen ausgesetzt sind. Es werden hierbei sowohl Nebenschlußmaschinen, als auch Doppelschlußmaschinen zur Stromerzeugung benutzt.

Die ersteren gestatten ohne weiteres die Anwendung einer Pufferbatterie (siehe Abschn. 113), welche die Stromstöße zum Teil aufnehmen und so die Generatoren entlasten. Um dieses Ziel möglichst vollständig zu erreichen, baut man die Maschinen absichtlich mit großem Spannungsabfall (bis 20%), da der Generator einen um so kleineren Teil der Überlastung aufnimmt, je steiler die äußere Charakteristik (siehe S. 605, Bd. I) abfällt.

In vielen Fällen erscheint es jedoch wünschenswert, diese Gesichtspunkte zurücktreten zu lassen und vielmehr darauf zu sehen, den Bahnmotoren bei allen Belastungen eine möglichst gleichmäßige Spannung zu bieten. Man erreicht dies durch Verwendung von Generatoren, die gerade so stark überkompoundiert sind, daß der Spannungsabfall, der bei Belastung in der Maschine und den Leitungen entsteht, durch eine entsprechende Erhöhung der induzierten EMK ausgeglichen wird.

Die Überkompoundierung wird vielfach so bemessen, daß die Klemmenspannung der Maschine von Leerlauf bis Maximallast etwa um 50 Volt steigt. Dieses System wird namentlich bei langen eingleisigen Strecken, bei denen es vorkommt, daß an einem entfernten Punkte zwei Wagen gleichzeitig anfahren, und bei kleineren Anlagen von Nutzen sein, bei welchen die Kosten der Pufferbatterie verhältnismäßig hoch ausfallen.

Die Vorteile einer Pufferbatterie kann man auch bei Doppelschlußgeneratoren erhalten, indem man vor die Batterie eine Zusatzmaschine schaltet. Dieses Puffersystem ist ausführlich im Abschnitt 114 behandelt. Die Anlage wird jedoch hierdurch kompliziert und verteuert.

Die Schwungmassen sind für die Bahnmaschinen, besonders wenn keine Pufferbatterie vorhanden ist, groß zu wählen, da sie nicht allein die Ungleichförmigkeit des Drehmomentes der Antriebsmaschine während einer Umdrehung auszugleichen haben, sondern auch bei plötzlichen Überlastungen den Energiebedarf zum Teil decken sollen, ohne daß ein zu starkes Sinken der Geschwindigkeit eintritt. Zur Berechnung des Schwunggewichtes bei Maschinen ohne Pufferbatterien kann man bei Antrieb durch

Digitized by Google

Kolbendampfmaschinen, wenn die Bahn keine großen Steigungen aufweist,

$$Gv^2 \geqq 6000\,(N + 100)^1)$$

annehmen, worin G das Schwunggewicht in kg, v die Geschwindigkeit des Schwungringes in m/sec und N die Leistung in PS ist.

Für Maschinen mit Pufferbatterien kann man das Schwunggewicht kleiner wählen, während bei Fehlen einer Batterie und starken Steigungen bis um 50% höhere Werte zu wählen sind.

Die Maschinen sind in mechanischer Hinsicht fest und gedrungen zu konstruieren, was man am besten durch Wahl eines geringen Ankerdurchmessers und großer Ankerlänge erzielt, soweit dies mit Rücksicht auf die Kommutation statthaft ist. Da eine Unterbringung der Schwungmassen im Anker, wie wir gesehen haben, einen großen Ankerdurchmesser bedingt, führt diese Anordnung bei Bahngeneratoren meist zu ungünstigen Abmessungen, dagegen ist es zweckmäßig, den Generator direkt neben das Schwungrad zu setzen und beide fest miteinander zu verbinden. Hierdurch werden Stöße in der Welle und dem Triebwerk stark abgeschwächt und gleichzeitig wird das Aggregat in der Achsenrichtung verkürzt.

Besondere Rücksicht ist bei der Bemessung der Bahngeneratoren auf ihr elektrisches Verhalten zu nehmen. Hier kommt vor allem in Betracht, daß sie bei allen Belastungen, d. h. auch bei den großen Belastungsstößen, ohne Bürstenverstellung funkenfrei arbeiten müssen. Es ist somit für eine starke Sättigung und richtige Formgebung der Polspitzen Sorge zu tragen und es sind ferner Äquipotentialverbindungen und harte Kohlen anzuwenden.

Auch die Kompoundierung begünstigt das funkenfreie Arbeiten der Maschinen, da hierbei das kommutierende Feld mit zunehmender Belastung verstärkt wird.

Genügen diese Mittel nicht zur Erzielung einer funkenfreien Kommutation, so sind Wendepole ($2p$ oder nur p) sehr am Platz.

Auf gute Isolierung gegen Erde ist bei Bahngeneratoren, deren negativer Pol ja immer an den Schienen bezw. an Erde liegt, besonders zu achten. Alle Teile, welche mit dem positiven Pol in Verbindung stehen, sind womöglich vor Berührung des Maschinenpersonals besonders zu schützen. Außerdem muß die positive mit dem Fahrdraht verbundene Leitung an allen vorspringenden Ecken und Kanten möglichst weit von der Erdpolleitung entfernt sein, um dem Blitz ein Überspringen an der Maschine zu erschweren.

---

[1]) Hütte. XVII. Aufl., S. 576.

Digitized by Google

Maschinen für metallurgische Zwecke. Die Maschinen für metallurgische Zwecke sind dadurch gekennzeichnet, daß sie bei geringer Spannung sehr große Stromstärken zu liefern haben. Die Spannung, welche durch die elektromotorische Gegenkraft der Elektrolytzellen und durch den Ohm'schen Spannungsabfall bestimmt wird, beträgt für Generatoren, die auf Bäder arbeiten, oft nur 3 bis 8 Volt, je nach der Zahl der hintereinander geschalteten Zellen; bei Maschinen, die den Strom für Schmelzzwecke liefern, ist sie entsprechend der Gegenkraft des Lichtbogens höher. Dagegen kommen hier Stromstärken von mehreren Tausend Ampere in Betracht, da ja die Menge des gewonnenen Metalls allein durch die Stromstärke bestimmt wird.

Die niedrige Spannung der Elektrolytmaschinen führt, wenn man sie als Nebenschlußmaschinen baut, zu unbequem großen Erregerquerschnitten und sehr hohen Erregerströmen, also auch großen und teueren Regulierwiderständen. Die Generatoren werden daher oft durch Erregermaschinen mit höherer Spannung erregt. Bei Maschinen für elektrische Schmelzöfen, bei denen es sich um höhere Spannungen handelt, kommt Fremderregung weniger in Betracht; auch hat diese hier den Nachteil, daß bei Kurzschluß im Ofen die Stromstärke außerordentlich anwachsen kann, was bei reinen Nebenschlußmaschinen nicht möglich ist. (Hier kommt auch die Querfelddynamo, Abschn. 99, in Frage.)

Die Erzeugung der starken Ströme bei so niedriger Spannung stellt an die Bemessung der Maschinen besondere Anforderungen. Die geringe Spannung verlangt, daß man die in einem Stab induzierte EMK (S. 11, Bd. I)

$$e = Blv \cdot 10^{-6}$$

klein wählt; man erhält sonst pro Ankerzweig zu wenig Stäbe, so daß kleine Verschiedenheiten der in einzelnen Stäben verschiedener Stromzweige induzierten EMKe stark zur Geltung kommen und starke innere Ströme entstehen können. Man muß somit die Luftinduktion, die Ankerlänge und die Umfangsgeschwindigkeit klein halten und Äquipotentialverbindungen reichlich vorsehen. Die Formel 10 Seite 224 lautet:

$$\frac{D^2 l_i n}{KW} = \frac{6 \cdot 10^{11}}{\alpha_i B_l A S};$$

setzt man $n = \frac{60 \cdot 100 \cdot v}{\pi D}$, so kann man schreiben

$$e = B_l l_i v \cdot 10^{-6} = \frac{\pi \cdot 10^2}{D \alpha_i A S}.$$

Digitized by Google

Der Durchmesser der Maschine wird somit groß und die Maschine dadurch teuer. Um bei großem Durchmesser noch eine kleine Umfangsgeschwindigkeit zu erhalten, muß die Tourenzahl im Verhältnis zur Leistung der Maschine gering sein.

Bei Maschinen ohne künstliche Kommutation bedingt die große Stromstärke eine große Anzahl von Ankerzweigen, weil man mit der Stromstärke pro Zweig nicht über 250—350 Amp. hinausgehen soll. Es kommen hier somit mehrfache Parallel- und Reihenparallelwicklungen mit $a > p$ in Anwendung. Auf Gleichheit der einzelnen Zweige ist großer Wert zu legen, außerdem ist für eine möglichst weitgehende Unterteilung der Ankerleiter zu sorgen, da sonst Wirbelstromverluste von beträchtlicher Höhe entstehen können. Die Leiter sind quer zur Nutenhöhe zu teilen (siehe Fig. 22, Nr. 7, Seite 19). Da man bei den niedrigen Spannungen nur Bürsten mit kleinem Übergangswiderstand anwenden kann und sehr große Stromstärken zu kommutieren sind, liegen die Verhältnisse bei diesen Maschinen in bezug auf die Kommutation besonders ungünstig.

Es ist somit auch für diese Maschinen die Anwendung von Wendepolen oft empfehlenswert. Man kann dann mit der Stromstärke pro Ankerzweig höher gehen, wodurch man in vielen Fällen eine bessere Wicklungsanordnung erhält.

95. Parallelschaltung von Nebenschlußgeneratoren.

In größeren elektrischen Zentralen werden in der Regel mehrere Generatoren aufgestellt, welche in den Zeiten größeren Stromverbrauches gemeinsam auf das Netz arbeiten. Die Schaltanordnung ist dabei, wie Fig. 422 zeigt, so zu treffen, daß sämtliche Generatoren einzeln oder gemeinsam auf das Netz arbeiten können, und es ist die Forderung zu stellen, daß jede einzelne Maschine beliebig zu- und abgeschaltet und die Belastung beliebig auf die einzelnen Maschinen verteilt werden kann.

Die Maschinen sollen beim Parallelbetrieb derart arbeiten, daß bei Belastungsschwankungen die Belastungsänderung sich gleichmäßig auf die einzelnen Generatoren verteilt, so daß alle Maschinen stets in gleicher Weise an der Stromlieferung teilnehmen. Im allgemeinen ist ein derartiges Parallelarbeiten von Nebenschlußgeneratoren leicht zu erzielen. Maßgebend hierfür ist der Spannungsabfall der Maschinen, der für prozentual gleiche Teile der Normallast möglichst gleich sein soll. Um dies zu erreichen, müssen die Generatoren annähernd gleich stark gesättigt sein und ihr Ankerwiderstand und ihre Ankerrückwirkung müssen sich ver-

Digitized by Google

halten wie ihre Leistungen. Wäre nämlich von zwei parallel geschalteten Maschinen die eine schwach gesättigt, hätte sie also eine steile Charakteristik, während die andere mit starker Sättigung arbeitete, so würde die stark gesättigte Maschine den größten Teil des Belastungszuwachses aufnehmen; denn sie kann bei gleichem Spannungsabfall eine größere Stromstärke abgeben als die schwach gesättigte. Ebenso wird eine Maschine mit verhältnismäßig größerem Ankerwiderstand oder stärkerer Ankerrückwirkung weniger Belastung aufnehmen als die andere, da bei ihr die gleiche Stromabgabe einen größeren Spannungsabfall hervorruft. Da jedoch in bezug

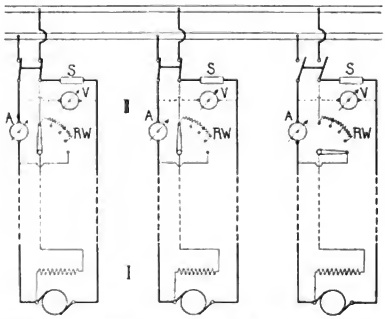


Fig. 422. Schaltungsschema für Nebenschlußgeneratoren mit doppelpoligen Ausschaltern.

auf die angegebenen drei Gesichtspunkte die meisten neueren Maschinen sich ganz ähnlich verhalten, so wird ein gutes Parallelarbeiten bei Nebenschlußgeneratoren in der Regel anstandslos erreicht.

Auch das Zuschalten eines Nebenschlußgenerators parallel zu einem bereits im Betrieb befindlichen geht leicht vonstatten und kann bei richtiger Handhabung zu keinerlei Störung Anlaß geben. Man bringt den zuzuschaltenden Generator auf die normale Tourenzahl, reguliert dann seine Erregung so, daß er die gleiche Klemmenspannung zeigt und legt darauf den Schalter ein. Der Generator wird dann vorerst noch keinen Strom abgeben, da ja seine induzierte EMK gleich der Sammelschienenspannung ist. Indem man ihn stärker erregt und gleichzeitig die Erregung der anderen Maschinen entsprechend vermindert, teilt man ihm seinen Anteil an der Belastung allmählich zu.

Digitized by Google

Soll eine Maschine abgeschaltet werden, so geht man einfach in umgekehrter Reihenfolge vor; man schwächt die Erregung der Maschine, bis diese keinen Strom mehr abgibt, und schaltet ab.

Die Schaltunng der Erregerwicklung. Den Erregerkreis der Nebenschlußgeneratoren kann man entweder direkt an die Sammelschienen legen oder man kann die Schaltung auch so anordnen, wie im Schema Fig. 422 angegeben ist. Die letztere Anordnung hat den Vorteil, daß man nur drei Leitungen von der Maschine (I) zur Schalttafel (II) erhält, da der eine Pol des Nebenschlusses direkt an die eine Klemme der Maschine gelegt wird; ferner wird hier der Nebenschluß bei Stillsetzen der Maschine von

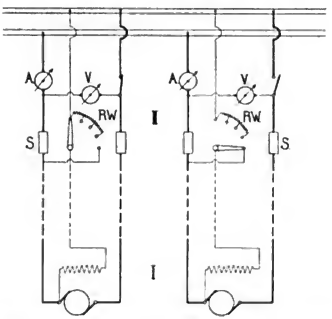


Fig. 423. Schaltungsschema für Nebenschlußgeneratoren mit einpoligen Ausschaltern.

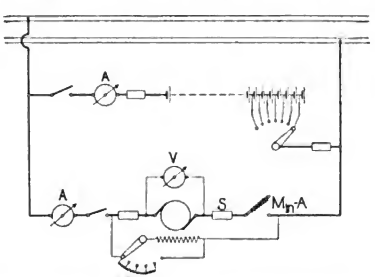


Fig. 424. Nebenschlußgenerator parallel mit einer Batterie.

selbst stromlos. Dagegen hat ein Umpolarisieren der Maschine bei dieser Schaltung zur Folge, daß die Maschine bei der nächsten Inbetriebsetzung mit falscher Polarität anläuft, was bei Abnahme des Erregerstromes von den Sammelschienen ausgeschlossen ist. Verzichtet man auf doppelpolige Ausschaltung, so kann man auch

Digitized by Google

bei Erregung von den Sammelschienen aus mit drei Leitungen zwischen Maschine (I) und Schalttafel (II) auskommen (s. Fig. 423).

Arbeiten die Maschinen parallel mit Akkumulatoren, so ist, um Stromumkehr im Anker zu vermeiden, ein Minimalausschalter (Min-A.) vorzusehen. Die Erregung ist dabei, wie Fig. 424 zeigt, stets vor dem Ausschalter abzuzweigen, denn die Erfahrung hat gezeigt, daß sonst die Maschinen bei Rückstrom aus den Akkumulatoren leicht umpolarisiert werden. Bei der angegebenen Schaltung ist dies natürlich ausgeschlossen, da die Magnete stets den richtigen Magnetisierungsstrom behalten.

Das Abschalten der Erregung ist in Abschn. 90, S. 445 bereits behandelt worden.

96. Parallelschaltung von Doppelschlußgeneratoren.

Gerade in bezug auf das Parallelarbeiten verhalten sich die Doppelschlußmaschinen weniger günstig als die Nebenschlußgeneratoren. Nehmen wir den Fall an, daß zwei genau kompoundierte Maschinen, deren Klemmenspannungen unabhängig von der Belastung und dem Tourenabfalle der Antriebsmaschine vollständig konstant bleiben, in der in Fig. 425 dargestellten Schaltung parallel arbeiten. Man wird sofort einsehen, daß ein Betrieb unmöglich ist, da die Belastung sich ganz beliebig auf beide Maschinen verteilen kann. Wäre z. B. die Nebenschlußerregung der einen Maschine aus irgendeinem Grunde etwas stärker als die der andern, so würde die erstere sofort die ganze Stromlieferung übernehmen und würde sogar Strom in die zweite hineinschicken und diese als Motor antreiben. Der Strom in der Hauptschlußspule würde sich dabei umkehren und, indem er die Nebenschlußerregung mehr und mehr kompensierte, ein Durchgehen der Maschine veranlassen. Eine derartig genaue Kompoundierung ist nun zwar nicht möglich (siehe S. 611, Bd. I) und unsere Annahme entspricht nur dem äußersten Fall; man sieht jedoch ein, daß auch bei nicht genau kompoundierten Maschinen große Belastungsverschiebungen eintreten können, wenn man sie in der gezeichneten Schaltung parallel arbeiten lassen wollte.

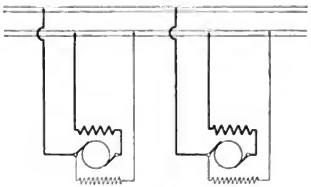


Fig. 425.

Digitized by Google

Um dieses zu verhüten, ordnet man eine Ausgleichsleitung (A-L) an, wie in Fig. 426 für drei parallel geschaltete Maschinen gezeigt ist; diese verbindet die an den Anker angeschlossenen Klemmen der Hauptschlußwickiung A, A_1, A_2 aller Maschinen, schaltet also sämtliche Hauptschlußwicklungen unter sich parallel. Hierdurch ist eine Stromumkehr im Hauptschluß unmöglich gemacht und die Labilität der Ankerstromstärke aufgehoben, da ein Anwachsen des Ankerstromes in einer Maschine die Erregungen aller anderen mit beeinflußt. Die Summe der in den Ankern sämtlicher Maschinen erzeugten Ströme verteilt sich jetzt in den Hauptschlußspulen entsprechend dem Verhältnisse ihrer Widerstände, und hierdurch ist wiederum der Anteil der einzelnen Anker an der Strom-

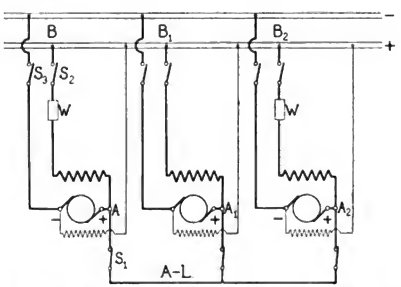


Fig. 426. Schaltungsschema für Doppelschlußgeneratoren.

lieferung bedingt. Hat z. B. bei zwei sonst ganz gleichen Maschinen der Hauptschluß der einen einen größeren Widerstand als der der andern, so wird in dem ersten ein etwas geringerer Strom fließen. Die Erregung dieser Maschine wird also schwächer als die der anderen, und auch ihr Anker wird infolge davon weniger Strom liefern. Die Widerstände der Strombahnen zwischen den Punkten A, A_1, A_2 der Ausgleichsleitung und B, B_1, B_2 der positiven Sammelschiene müssen daher stets so abgeglichen werden, daß sich der Strom entsprechend der Größe der einzelnen Maschinen in den Hauptschlußspulen verteilt; nur dann ist ein richtiges Parallelarbeiten möglich. Zu diesem Zwecke sind allenfalls besondere Widerstände W, z. B. Nickelinbänder, in die Leitungen hinter die Hauptschlußspulen, die einen verhältnismäßig kleinen Widerstand haben, einzuschalten.

Digitized by Google

B. Jacobi[1]) schreibt, daß, um ein richtiges Parallelarbeiten zu sichern, der Widerstand der beiden zugehörigen Hauptschlußwicklungen nebst den beiden Zuleitungen zu den Sammelschienen plus dem Widerstand des dazwischen liegenden Stückes der Sammelschienen unter allen Umständen größer sein muß, als der Widerstand der Ausgleichleitung. Um einer falschen Handhabung der Schalter der Ausgleichleiter vorzubeugen, ist die Anordnung einer besonderen Sammelschiene für die Ausgleichleitung an der Schalttafel üblich. Fig. 427 zeigt schematisch die entsprechende Anordnung. Der Schalter S schließt gleichzeitig die Maschine an die +-Schiene und die Klemme A an die Ausgleichleitung an. Die Ausgleichleitung wird somit zwangläufig mit der Maschinenleitung geschlossen und geöffnet.

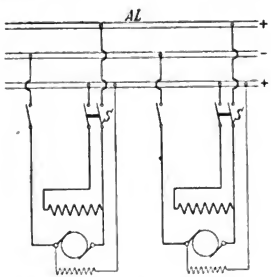


Fig. 427. Schaltungsschema für Doppelschlußgeneratoren mit besonderer Sammelschiene für die Ausgleichleitung.

Beim Zuschalten einer Doppelschlußmaschine zu einer bereits auf das Netz arbeitenden kann man auf zwei verschiedene Arten vorgehen. Bei der einen Methode schließt man zuerst den Schalter S_1 am Ausgleicher und S_2 an der positiven Schiene (Fig. 426 oder S in Fig. 427), so daß der Hauptschluß von den bereits arbeitenden Maschinen aus Strom erhält. Hierauf reguliert man die Nebenschlußerregung so ein, daß der Anker die gleiche Spannung zeigt wie die andern, und schaltet dann auch den Schalter auf der negativen Seite ein, so daß nun alle drei Schalter geschlossen sind.

Ein zweiter Weg, den man einschlagen kann, ist, die Maschine erst allein mit der Nebenschlußwicklung so zu erregen, daß sie die gleiche Spannung zeigt wie die anderen, und dann alle drei Schalter, welche an einem Griff vereinigt sind, gleichzeitig einzulegen. Falls die Ausgleichleitung nicht zum Schaltbrett geführt ist, legt man zuerst ihren Schalter S_1 und dann die beiden anderen verbundenen Schalter S_2 und S_3 (Fig. 426) zugleich ein, was natürlich in der Wirkung dem gemeinsamen Einschalten von allen drei Schaltern gleich ist.

Bei der erstbeschriebenen Art wird sich beim Einlegen des

[1]) Über Ausgleichleitungen bei Kompoundmaschinen. ETZ 1906, S. 365.

Digitized by Google

letzten Hebels in der Stromverteilung nichts ändern, denn die Spannung an sämtlichen Ankern ist gleich und die Hauptschlußspulen führen alle den ihrem Widerstande entsprechenden Teil des gesamten Belastungsstromes. Die zugeschaltete Maschine wird anfangs gar nicht an der Stromlieferung teilnehmen, und erst wenn man ihren Nebenschlußstrom allmählich verstärkt, während man den der andern Maschine schwächt, kann man ihr ihren Anteil an der Belastung zuteilen. Die Maschine läuft also vollständig wie eine Nebenschlußmaschine an und das Einschalten kann zu keinem Hin- und Herschwanken der Belastung zwischen den Maschinen, d. h. zu keinem Pendeln der Leistung Anlaß geben.

Ferner hat diese Schaltung den Vorteil, daß man die Maschine stets leicht auf die richtige Polarität bringen kann, indem man bei kurzgeschlossenem oder abgetrenntem Nebenschluß den Hauptschluß allein einschaltet. Ein Nachteil ist dagegen, daß das Einschalten der Hauptschlußspulen, das dem Einschalten des Ankers vorausgeht, zu einem Abfall der Netzspannung Anlaß geben kann. Es wird nämlich hierbei parallel zur Hauptschlußwicklung der arbeitenden Maschine plötzlich ein weiterer Stromkreis gelegt; ein Teil des Belastungsstromes fließt durch diesen und die Stromstärke in den Hauptschlußspulen vermindert sich, so daß die Spannung fällt. Hier wirkt nun die große Selbstinduktion der zugeschalteten Hauptschlußspulen günstig, indem sie das Anwachsen des Stromes in der zugeschalteten und das Sinken in den bereits arbeitenden Spulen verzögert, so daß man Zeit hat, durch Regulieren der Nebenschlußerregung ein zu starkes Abfallen der Netzspannung zu verhindern. Die Spannungsschwankung wird natürlich verschieden sein, je nach der Stärke der Kompoundierung und je nach dem Verhältnis des Widerstandes der zugeschalteten Hauptschlußwicklung zu dem der anderen. Am meisten wird sie sich fühlbar machen bei stark überkompoundierten Maschinen, bei welchen die Hauptschlußwicklung einen verhältnismäßig großen Anteil an der Erregung hat, oder beim Zuschalten einer größeren Maschine mit kleinem Hauptschlußwiderstand zu einer kleineren Maschine, deren Hauptschlußwiderstand entsprechend höher ist.

Bei der zweiten Art des Parallelschaltens wird diese Spannungsschwankung im Netz, sofern die Maschinen nicht überkompoundiert sind, vermieden. Gleichzeitig mit dem Ansteigen des Stromes in der Hauptschlußwicklung der hinzutretenden Maschine nimmt hier nämlich auch deren Anker an der Stromlieferung teil, während sich die Belastung der anderen Maschinen entsprechend vermindert, so daß die Schwächung ihrer Erregung durch die Verkleinerung des Spannungsabfalles ausgeglichen wird.

Digitized by Google

Bei Überkompoundierung wird sich jedoch auch hier ein Spannungsabfall einstellen. Die Überkompoundierung sinkt nämlich hier auf die Hälfte, da sich nach dem Parallelschalten von zwei Maschinen der Linienstrom, der ja durch das Schalten nicht beeinflußt wird, auf die beiden Hauptschlußwicklungen verteilt.

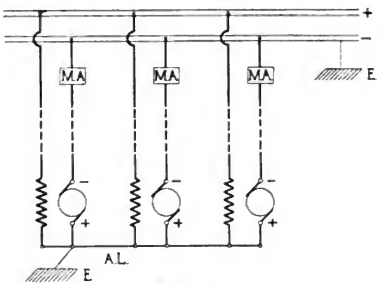


Fig. 428a.

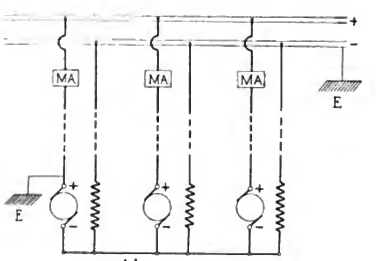


Fig. 428b.

Fig. 428a und b. Schaltung der Hauptstromwicklung bei Straßenbahngeneratoren.

Mit Rücksicht auf konstante Netzspannung scheint somit diese Methode vorteilhafter zu sein als die erstbehandelte. Sie hat jedoch den Nachteil, daß infolge der plötzlichen Belastung der hinzugeschalteten und Entlastung der im Betrieb befindlichen Maschine ein Hin- und Herschwanken der Belastung zwischen beiden und ein Pendeln der Antriebsmaschinen entstehen kann. Die Methode ist also in bezug auf die Beanspruchung der Antriebsmaschinen

Digitized by Google

weniger günstig als die erste, bei welcher eine allmähliche Belastung erreicht wird.

Welche von beiden Methoden zu wählen ist, muß von Fall zu Fall entschieden werden. Wo es auf genaues Konstanthalten der Spannung nicht ankommt, z. B. beim Bahnbetrieb, wird man oft die erste Methode wählen; während bei Lichtbetrieb, namentlich wenn abends eine größere Maschine zu einer kleineren zugeschaltet werden soll, die zweite Methode vorteilhafter erscheinen kann.

Bei Straßenbahngeneratoren, bei welchen wegen der elektrolytischen Wirkung der vagabundierenden Ströme die Fahrschienen immer mit dem negativen Pol verbunden werden, ist darauf zu achten, daß die Hauptschlußwicklung an die positive Klemme des Ankers angeschlossen ist[1]) (Fig. 428a).

Wird der Hauptschluß an die negativen Ankerklemmen angeschlossen, d. h. zwischen Anker und Fahrschienen eingeschaltet (Fig. 428b), so wird, falls im Anker der Maschine irgendwie Erdschluß *E* entsteht, diese sich wie ein kurzgeschlossener Hauptschlußgenerator verhalten, und die hierbei auftretende sehr hohe Stromstärke kann leicht eine Beschädigung der Maschine herbeiführen. Man könnte dies, wenn die Ausgleichsleitung auf der Schalttafel verlegt ist, auch dadurch vermeiden, daß man den Maximalausschalter, der ja bei Straßenbahngeneratoren stets angewendet wird, zwischen der negativen Ankerklemme und der Ausgleichsleitung *A. L.* anordnet.

Den Maximalausschalter zwischen Hauptschluß und negativer Sammelschiene einzuschalten, ist natürlich nicht statthaft, da ja dann der Strom im Anker und Maximalausschalter verschieden sein könnte. Abgesehen von diesem Gesichtspunkte hat die Anordnung der Hauptschlußwicklung zwischen Fahrdraht und Anker noch den weiteren Vorteil, daß sie zugleich als Blitzschutzspule für den Anker wirkt.

---

[1]) G. U. G. Holman, Street Railway Journ. Nov. 1901, S. 407.

Digitized by Google

Dreiundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren für annähernd konstante Klemmenspannung bei konstantem äußerem Widerstande und veränderlicher Tourenzahl.

97. Allgemeines. — 98. Anordnung von G. G. Milne und Generator von M. Milch. — 99. Querfelddynamo von E. Rosenberg. — 100. Maschine von M. Osnos.

97. Allgemeines.

Maschinen für konstante Klemmenspannung bei veränderlicher Tourenzahl kommen hauptsächlich in Frage für Zugbeleuchtung, wenn die Generatoren von den Wagenachsen angetrieben werden, und für Beleuchtungsanlagen, welche mit Windmühlen betrieben werden.

Ändert sich die Tourenzahl und will man die EMK

$$E_a = \frac{N}{a} \cdot \frac{pn}{60} \cdot \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

konstant halten, so ist dies nur durch Änderung des Kraftflusses Φ möglich. Um diese bei veränderlicher Tourenzahl selbsttätig zu gestalten, werden mehrere Schaltungen angewendet. Sie lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: zur ersten gehören diejenigen, bei welchen die Änderung der Erregung durch Strom-, Spannungs- oder Tourenrelais und Feldregulator vorgenommen wird, zur zweiten diejenigen, bei welchen die Änderung der Erregung durch besondere Schaltung und kombinierte Wirkung mehrerer Maschinen oder durch eine besonders für diesen Zweck gebaute Maschine erzielt wird.

Wir wollen uns auf die Beschreibung einiger Typen der letzten Gruppe beschränken.

Digitized by Google

98. Anordnung von G. G. Milne und Generator von M. Milch.

Fig. 429 zeigt schematisch die Schaltung von G. G. Milne.[1]) Es ist *A* der Generator, dieser ist mit *B* direkt gekuppelt. Ferner ist *C* ein Motor, der am Netz liegt und den Generator *D* antreibt. Die Maschinen *B* und *D* werden vom Netz erregt. Die Maschine *B* erregt den Motor *C* und die Maschine *D* erregt den Hauptgenerator *A*. Die Wirkungsweise ist folgende: Sinkt die Tourenzahl der Maschinen *A* und *B*, so sinkt die Spannung an den Klemmen der Maschine *B*, wodurch die Erregung des Motors *C* verkleinert wird. Der Motor *C* wird somit schneller laufen, und in der Maschine *D* wird eine höhere Spannung induziert, wodurch die Erregung der Maschine *A* erhöht wird. Diese Überlegung ist natürlich nur dann richtig, wenn die Spannung des Netzes zum Beispiel dadurch, daß eine Batterie vorhanden ist, annähernd konstant bleibt.

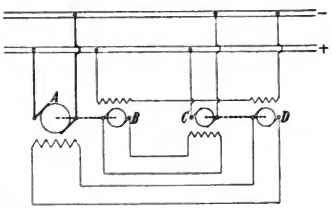


Fig. 429. Schaltung von G. G. Milne.

In Fig. 430 ist die von M. Milch[2]) angegebene Maschine schematisch dargestellt. Der Anker ist zweipolig gewickelt. Es sind vier körperliche Pole vorhanden, doch hat die Maschine magnetisch nur zwei Pole. Die Nebenschlußwicklung *A A* ist so angeordnet, daß die Pole 1—2 und 3—4 unter ihrem Einfluß allein (bei Leerlauf) je gleiche Polarität und gleiche Stärke erhalten. Der Generatorstrom wird entsprechend der von den Nebenschlußspulen herrührenden Magnetisierung mittelst der Bürsten *b b* abgenommen. In Serie mit diesen Bürsten und dem Anker liegen die Spulen *B B*. Die Amperewindungen dieser Spulen erzeugen für sich allein ein Feld in der Richtung der Bürsten *b b* und entgegengesetzt dem Ankerfelde, und zwar ist das von den Spulen *B B* erzeugte Querfeld größer als das Ankerfeld. Durch Drehung des Ankers in dem so erzeugten Querfelde wird zwischen den Bürsten *b' b'* eine EMK induziert. Diese schickt in die Spulen *C C C C* einen Strom, der so

[1]) D.R.P. Nr. 155278.
[2]) Electrical World, Vol. XLVIII, S. 1186.

Digitized by Google

gerichtet ist, daß die Spulen A und C einander entgegenwirken und die Spulen B und C einander unterstützen. Die Wirkungsweise der Maschine ist jetzt wie folgt: steigt die Tourenzahl der Maschine, so steigt die Spannung; hierdurch wird der Arbeitsstrom größer und es wächst das von den Spulen $B\,B$ erzeugte Querfeld. Die Spannung zwischen den Bürsten $b'\,b'$ wird jetzt aus zwei Ursachen vergrößert: einmal, weil das Querfeld zunimmt und einmal, weil die Tourenzahl zunimmt. Die magnetisierende Kraft der Spulen $C\,C$,

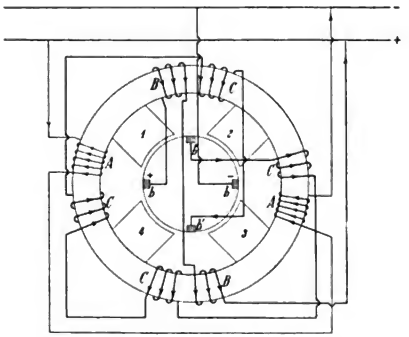


Fig. 430. Generator von M. Milch.

welche an die Bürsten $b'\,b'$ angeschlossen sind, wächst daher mit zunehmender Tourenzahl, sie schwächen die Wirkung der Nebenschlußspulen und verstärken noch die Wirkung der Spulen $B\,B$, wodurch abermals die Spannung zwischen den Bürsten $b'\,b'$ erhöht wird. Beim Anwachsen der Tourenzahl und des Stromes ist somit die schwächende Wirkung der Spulen $C\,C$ auf die Nebenschlußspulen $A\,A$ eine sehr große und es wird die Maschine bei verschiedenen Tourenzahlen einen nahezu konstanten Strom bezw. konstante Spannung geben können.

Die Maschine kann auch verwendet werden, um bei konstanter Tourenzahl bei verschiedenen äußeren Widerständen einen nahezu konstanten Strom zu erhalten.

Digitized by Google

99. Querfelddynamo von E. Rosenberg.

In sehr eleganter Weise wurde die Aufgabe durch Dr. techn. E. Rosenberg[1]) gelöst. Die Maschine, welche wir im nachfolgenden ihrer Wirkungsweise nach als Querfelddynamo bezeichnen wollen, gibt ohne komplizierte Wicklungen und ohne Zwischenschaltung von anderen Apparaten oder Maschinen bei einem konstanten äußeren Widerstand einen nahezu konstanten Strom bezw. konstante Spannung bei stark veränderlicher Tourenzahl. In Fig. 431 ist die Maschine schematisch dargestellt.

Die Pole sind mit einer schwachen, von einer Batterie aus erregten Magnetwicklung F versehen. Die Querschnitte des Jochs und der Magnetschenkel sind klein gehalten, dagegen sind die Polschuhe stark ausgebildet. In der neutralen Zone dieses Hauptfeldes stehen die Bürsten $b\,b$, welche miteinander widerstandslos verbunden sind. Sobald durch die Verbindung dieser Bürsten ein Strom fließt, entsteht ein Feld, dessen Achse in der Richtung $b\,b$ liegt. Wir wollen dieses Feld als Querfeld bezeichnen, denn es ist identisch mit dem in jeder gewöhnlichen Maschine von den Ankerströmen erzeugten Querfelde, hier ist jedoch einerseits durch den direkten Kurzschluß der Bürsten $b\,b$ und andererseits durch die Form der Polschuhe dafür gesorgt, daß eine schwache Felderregung zur Erzeugung eines starken Querfeldes ausreicht. In der neutralen Zone dieses Querfeldes stehen die Bürsten $B\,B$, welchen der Nutzstrom entnommen wird.

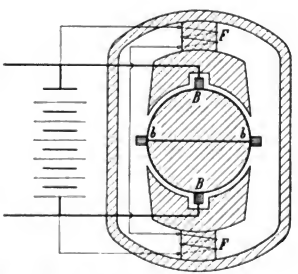


Fig. 431. Querfelddynamo mit Fremderregung.

Die Wirkungsweise der Maschine ist jetzt wie folgt: Bei einer bestimmten Tourenzahl liefert der Anker einen bestimmten Nutzstrom über die Bürsten $B\,B$ an den äußeren Stromkreis. Dieser Strom erzeugt ein magnetisches Feld in Richtung der Achse $B\,B$. Dieses Feld ist so gerichtet, daß es dem von den Amperewindungen der Wicklung F erzeugten Feld entgegenwirkt. Das resultierende Feld,

[1]) ETZ 1905, S. 393, S. 525 u. S. 637. — Z. f. E. 1905, S. 271. — ETZ 1906, S. 1035.

Digitized by Google

welches durch die Differenz der Ankeramperewindungen und der AW der Spule F hervorgerufen wird, erzeugt bei der Rotation des Ankers eine EMK zwischen den Bürsten $b\,b$. Diese EMK ist auf den Ankerwiderstand kurzgeschlossen und erzeugt somit im Anker einen Strom, welcher das Querfeld hervorruft. Durch die Rotation des Ankers in diesem Querfelde wird schließlich zwischen den Bürsten $B\,B$ eine bestimmte EMK induziert. Der Nutzstrom kann niemals so groß werden, daß das Ankerfeld in der Richtung der Bürsten $B\,B$ das von den Nebenschlußwindungen F erzeugte Feld vollkommen kompensiert, denn in diesem Fall würde zwischen den Bürsten $b\,b$ keine EMK induziert werden und es wäre kein Querfeld vorhanden. Der Nutzstrom kann somit, wie groß auch die Tourenzahl wird, niemals einen bestimmten Betrag überschreiten.

Wie der Strom sich mit der Tourenzahl ändert, ist jetzt leicht zu verfolgen. Sei Φ der resultierende Fluß in der Achse $B\,B$, so wird zwischen den Bürsten $b\,b$ eine EMK proportional Φn induziert. Da diese EMK auf die Ankerwicklung kurzgeschlossen ist, ist auch das Querfeld proportional Φn und die zwischen den Bürsten $B\,B$ induzierte EMK E_a proportional Φn^2. Wirkt diese EMK auf einen Kreis von konstantem Widerstand, so ist auch der Nutzstrom J proportional Φn^2. Wir müssen jetzt noch die Abhängigkeit des Kraftflusses Φ vom Strome J ermitteln. Nehmen wir an, daß keine Sättigungen im Kreis des Flusses Φ auftreten und bezeichnen wir mit AW_n die Nebenschlußamperewindungen und mit Jw_a die Amperewindungen des Ankers, so ist Φ proportional $AW_n - Jw_a$ und wir erhalten somit, wenn C eine Konstante ist,

$$J = C(AW_n - Jw_a)n^2$$

oder

$$J = \frac{AW_n}{w_a + \frac{1}{Cn^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (181)$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß, wie wir schon früher fanden, der Strom einen Maximalwert nicht überschreiten kann; für $n = \infty$ wird

$$J = \frac{AW_n}{w_a} \quad \text{oder} \quad Jw_a = AW_n,$$

d. h. die Amperewindungen des Ankers können niemals größer als die Amperewindungen der Nebenschlußspule werden.

Fig. 432 stellt die nach Formel 181 gerechnete Abhängigkeit des Stromes J von der Tourenzahl n dar. Arbeitet man über der Tourenzahl OA, so kann die Schwankung des Stromes bezw. der Spannung höchstens $10\,\%$ betragen. Zieht man die Sättigung des

Digitized by Google

Magnetkreises des Hauptfeldes in Betracht, so wird hierdurch nur der Verlauf des aufsteigenden Astes der Kurve 432 ein anderer werden, da bei den höheren Tourenzahlen die Ankeramperewindungen nahezu gleich den Amperewindungen der Nebenschlußspule sind. (Über der Tourenzahl OA ist die Differenz der genannten Amperewindungen höchstens 10% der Amperewindungen der Nebenschlußspule.) Eine genaue Berücksichtigung der Sättigung wird dadurch erschwert, daß der von den Nebenschlußamperewindungen erzeugte und der von den Ankeramperewindungen erzeugte Kraftfluß nicht in demselben Kreis verlaufen. Bei hohen Sättigungen nämlich wird das von den Ankeramperewindungen erzeugte Feld seinen Weg durch die großen Polschuhe nehmen und sich durch die Luft zwischen den Polschuhen schließen. Um ein Urteil über die Abhängigkeit des Stromes von der Tourenzahl zu bekommen, genügt die von uns aufgestellte Betrachtung, bei welcher der Kraftfluß proportional der Differenz von Anker- und Nebenschlußamperewindungen gesetzt wurde.[1])

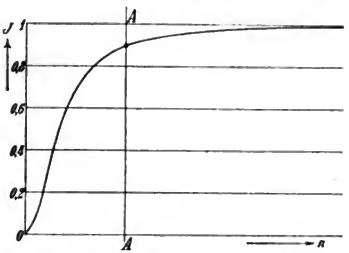


Fig. 432. Abhängigkeit des Belastungsstromes von der Tourenzahl.

Es ist noch zu bemerken, daß diese Maschine unabhängig von der Drehungsrichtung einen Strom in der gleichen Richtung liefert. Bei Umkehrung der Drehrichtung kehrt sich die Polarität der Bürsten $b\,b$ und somit auch die Richtung des Querfeldes um. Die Bürsten BB halten jedoch ihre Polarität bei, da erstens die Drehrichtung und zweitens die Richtung des Querfeldes sich umgekehrt hat.

Die Maschine von Rosenberg eignet sich daher besonders für Zugbeleuchtung.

In Fig. 433 sind die Versuchskurven einer Querfeldynamo für Zugbeleuchtung aufgezeichnet, und zwar wurden die Kurven bei konstantem äußerem Widerstande aufgenommen, während die Maschine von einer Batterie erregt wurde. Zwischen 800 und 2300 Umdr.

[1]) Bei einer genauen Theorie wären, wie von Rosenberg hervorgehoben wurde, die von den kurzgeschlossenen Ankerspulen hervorgerufenen Magnetfelder zu berücksichtigen.

Digitized by Google

pr. Min. entsprechend einer Fahrgeschwindigkeit von 35 und 100 km/st ändern sich Spannung und Stromstärke nur um ca. 12%.

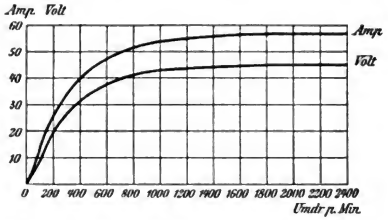


Fig. 433. Versuchskurven einer Querfelddynamo.

In Fig. 434 ist die Stromstärke in Abhängigkeit von der Tourenzahl für verschiedene Erregungen beim Parallelarbeiten mit einer Batterie aufgetragen. Wir sehen, daß innerhalb des Arbeitsbereiches dieser Kurven einer bestimmten Erregung eine bestimmte und konstante Arbeitsstromstärke entspricht. Bei den Tourenzahlen, bei welchen die verschiedenen Kurven die Abszissenachse schneiden, erreicht die Maschine die Spannung der Batterie und fängt an, an der Stromlieferung teilzunehmen.

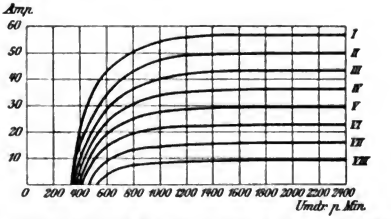


Fig. 434. Abhängigkeit des Belastungsstromes von der Tourenzahl bei verschiedenen Erregungen beim Parallelarbeiten mit einer Batterie.

Fig. 435 und 436 zeigen die Konstruktion einer derartigen Maschine. Da es sich bei dieser Maschine darum handelte, den Anker aus den Teilen einer normalen Maschine zusammenzusetzen, mußte, um den Kommutatordurchmesser beizubehalten, der Bürstenstern in der Mitte des Kommutators angebracht und die Nutzbürsten nach der einen, die Hilfsbürsten nach der anderen Seite angeordnet werden.

Digitized by Google

Wird die Querfelddynamo mit konstanter Tourenzahl angetrieben, so gibt sie bei veränderlichem äußerem Widerstande einen nahezu

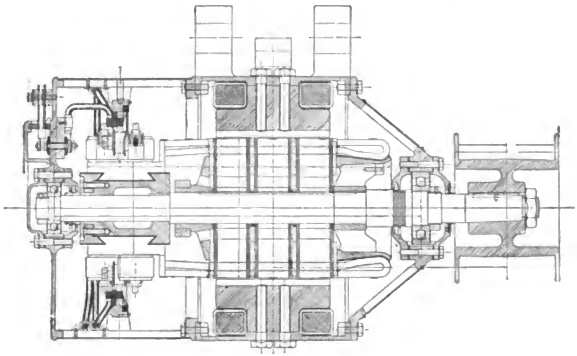


Fig. 435.

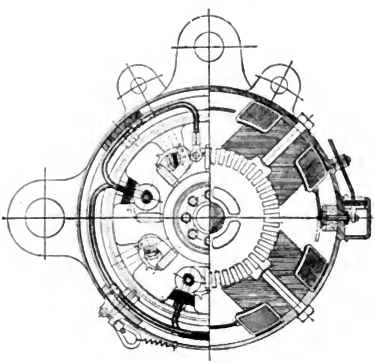


Fig. 436.

Fig. 435 und 436. Konstruktion einer Querfelddynamo.

konstanten Strom. Bei Kurzschluß liefert die Maschine einen bestimmten Strom, der so bemessen werden kann, daß er die Maschine

Digitized by Google

nicht gefährdet. Dies ist auch leicht einzusehen, da der Ankerstrom niemals so groß werden kann, daß der von den Magnet- und Ankeramperewindungen hervorgerufene Hauptkraftfluß Null wird.

Fig. 437 zeigt die äußere Charakteristik einer fremderregten, mit konstanter Tourenzahl angetriebenen Querfelddynamo. Sie ist gebaut für eine normale Leistung von 40 Volt und 50 Amp. Aus der Figur ist ersichtlich, daß bei einer Spannungsänderung von 0 — 80 Volt, d. i. von 200% der normalen Spannung, die Stromstärke sich nur von 57 auf 33 Amp., d. i. um 48% des normalen Stromes ändert.

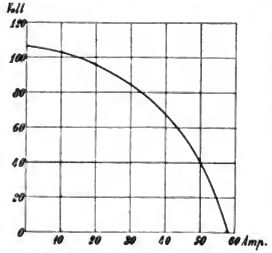


Fig. 437. Äußere Charakteristik einer fremderregten Querfelddynamo.

Ist eine so große Konstanz des Stromes nicht erforderlich, so kann man die Maschine auch mit Selbsterregung, und zwar mit Hauptschlußerregung bauen.

Fig. 438 zeigt die Schaltung und Fig. 438a die äußere Charakteristik einer solchen Maschine. Der eigentümliche Verlauf der äußeren Charakteristik läßt sich auf folgende Weise erklären. Im

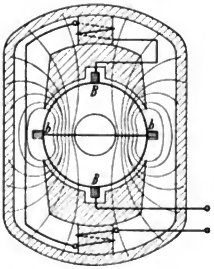


Fig. 438. Querfelddynamo mit Hauptschlußerregung.

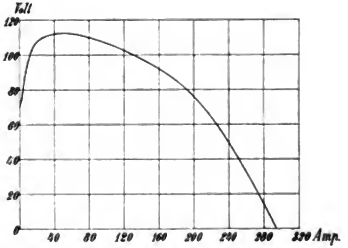


Fig. 438a. Äußere Charakteristik einer Querfelddynamo mit Hauptschlußerregung.

Anfang steigt mit Zunahme des Stromes das Hauptfeld und somit das Querfeld und die Spannung an den Bürsten *B B* an, bis das Joch und die Magnete, welche nur einen kleinen Querschnitt haben, stark gesättigt sind. Dies trifft schon bei einem verhältnismäßig kleinen Strom zu. Der Kraftfluß im Joch und in den Magneten

Digitized by Google

vergrößert sich bei einem weiteren Ansteigen des Stromes nur unbedeutend. Das Ankerfeld in der Richtung der Bürsten BB kann sich jedoch frei ausbilden, weil es die großen Querschnitte des Ankers und der Polschuhe zur Verfügung hat (s. Fig. 438). Dieses Feld wird sich somit fast proportional mit dem Strom ändern. Der resultierende Hauptkraftfluß wird somit mit zunehmender Stromstärke abnehmen und somit auch die Spannung zwischen den Bürsten BB.

Die äußere Charakteristik, sowohl der fremderregten wie der im Hauptschluß erregten Maschine, eignet sich sehr gut zur Speisung von in Reihe geschalteten Bogenlampen, da diese ohne Vorschaltwiderstand an die Maschine angeschlossen werden können, wodurch ein geringerer Wattverbrauch erreicht wird. Auch für Lichtbogenschweißung eignet sich die Maschine.

100. Maschine von M. Osnos.[1])

Diese Maschine besteht aus einer gewöhnlichen Dynamomaschine und einer eigenartigen mit ihr gekuppelten Erregermaschine. Damit die Maschine bei veränderlicher Tourenzahl eine praktisch konstante Spannung liefert und ihre Polarität mit der Drehrichtung nicht ändert, muß das Erregerfeld, d. h. die Spannung der Erregermaschine mit der Tourenzahl abnehmen und ihre Richtung mit der Drehrichtung der Maschine ändern.

In Fig. 439 ist die Anordnung dargestellt. Es bedeutet D die Dynamo, s_1 ihre Erregerwicklung, die den Strom i_1 von der mit der Dynamo gekuppelten Erregermaschine E erhält. Die letztere besitzt außer den gewöhnlichen Arbeitsbürsten aa senkrecht dazu stehende Hilfsbürsten bb, in deren Stromkreis die Erregerwicklung s_2 der Erregermaschine und die Batterie B liegen. Ferner liegt in Reihe mit den Arbeitsbürsten aa eine mit dem Ankerquerfeld gleichachsige Wicklung s_3.

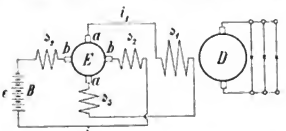


Fig. 439. Schaltung der Maschine von M. Osnos.

Die Wirkungsweise ist nun folgende: Von dem über die Bürsten aa fließenden Strom i_1 der Erregermaschine wird durch die Ankerwindungen und die Spule s_3 ein in Richtung dieser Bürsten ver-

[1]) Neue Zugbeleuchtungsmaschine der Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke. ETZ 1907, S. 917.

Digitized by Google

laufendes Ankerfeld erzeugt. In diesem Querfeld rotiert der Anker selbst und es entsteht daher an den in der neutralen Zone dieses Querfeldes liegenden Hilfsbürsten bb eine EMK, die mit e_2 bezeichnet werden mag. e_2 wirkt der Batteriespannung e entgegen, so daß der Erregerstrom i_2 der Erregermaschine bei Vernachlässigung der Sättigung des Eisens

$$i_2 = k'(e - e_2)$$

ist, wobei k' eine Konstante bedeutet.

Da e_2 durch die Rotation des Ankers in dem von i_1 erzeugten Querfelde entsteht, so kann man schreiben

$$e_2 = k_2'' i_1 n.$$

Andererseits entsteht i_1 aus der EMK, die zwischen den Bürsten aa induziert wird, diese Bürsten stehen in der neutralen Zone des vom Strom i_2 erzeugten Feldes, daher ist

$$i_1 = k''' i_2 n.$$

Aus obigen drei Gleichungen ergibt sich zwischen dem Erregerstrom i_1 der Dynamo D und ihrer Tourenzahl eine Beziehung von der Form

$$i_1 = \frac{n}{a + b n^2},$$

wobei a und b Konstante bedeuten.

Wie aus dieser Beziehung ersichtlich, nimmt von einem gewissen Werte von n an der Erregerstrom i_1 mit der Tourenzahl ab. Durch geeignete Wahl von a und b, d. h. der magnetischen Verhältnisse der Erregermaschine, kann man die Stelle, von welcher an i_1 abnehmen soll, beliebig im voraus festlegen.

Ändert sich die Drehrichtung der Maschine, so wechselt auch die Spannung der Erregermaschine und damit der Erregerstrom der Dynamo D ihre Richtung, die Spannung der letzteren behält daher bei jedem Drehsinn ihre Richtung.

Versuchsresultate ergaben beispielsweise, daß der höchste Wert, dem die Maschinenspannung sich nähert, 83 Volt betrug, während 80 Volt bei 1000 Umdrehungen und 70 Volt bei 600 Umdrehungen erhalten wurden. Die normale Tourenzahl der Maschine war etwa gleich 1200.

Die Wicklung s_3, welche das Querfeld verstärkt, könnte weggelassen werden, sofern, ähnlich wie bei der Maschine von Rosenberg, dafür gesorgt wird, daß der magnetische Widerstand für das Querfeld genügend klein ist.

Digitized by Google

Vierundzwanzigstes Kapitel.

Motoren für konstante Klemmenspannung.

101. Motoren für konstante Klemmenspannung und Nebenschlußerregung. — 102. Motoren für konstante Klemmenspannung und Hauptschlußerregung. — 103. Motoren für konstante Klemmenspannung und Doppelschlußerregung.

101. Motoren für konstante Klemmenspannung und Nebenschlußerregung.

Auf Seite 408 fanden wir das auf den Anker ausgeübte Drehmoment

$$\vartheta_a = \frac{10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 9{,}81} \frac{p}{a} N \Phi J_a \text{ kgm.}$$

Dieses Drehmoment wird jedoch teilweise verbraucht, um die Arbeit für die Eisen- und Reibungsverluste zu liefern. Das vom Motor abgegebene Drehmoment kann man gleich

$$\vartheta = g_m \vartheta_a = \frac{g_m \cdot 10^{-8}}{2 \cdot \pi \cdot 9{,}81} \frac{p}{a} N \Phi J_a \text{ kgm} \quad . \quad . \quad (182)$$

setzen.

Weiter ist die Tourenzahl einer Maschine

$$n = 60 \cdot 10^8 \frac{a}{p} \frac{1}{N} \frac{E_a}{\Phi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (183)$$

Durch die beiden Größen Drehmoment und Tourenzahl ist das Verhalten der Motoren bestimmt.

Bei Nebenschlußmotoren kann man den Kraftfluß Φ unabhängig von der Belastung einstellen. Bei einem bestimmten Kraftfluß ist das Drehmoment, wenn man von der Änderung des Wirkungsgrades g_m absieht, dem Strome proportional und unabhängig von der Tourenzahl. Weiter ist bei einer bestimmten Klemmenspannung die Tourenzahl nahezu unabhängig von der Belastung, weil E_a

Digitized by Google

wegen dem Ohmschen Anteil und Φ wegen der Ankerrückwirkung annimmt und sich $\frac{E_a}{\Phi}$ daher wenig ändert.

Wir können die Eigenschaften des Nebenschlußmotors wie folgt zusammenfassen:

1. Bei konstanter Erregung ist die Tourenzahl des Nebenschlußmotors vom Leerlauf bis Vollast annähernd konstant, also vom aufgelegten Drehmoment annähernd unabhängig.

2. Das Drehmoment bzw. die Anzugskraft des Nebenschlußmotors ist bei konstanter Erregung der Ankerstromstärke direkt proportional.

3. Eine Änderung oder ein genaues Konstanthalten der Tourenzahl ist durch Regulierwiderstände im Erregerkreis auf sehr einfache und ökonomische Weise zu erreichen.

4. Der Motor läuft, wenn er durch eine äußere Kraft angetrieben wird, in gleicher Drehrichtung ohne Schaltungsänderung als Generator weiter und liefert Strom ins Netz zurück. Dabei wirkt er gleichzeitig als selbsttätige Bremse, behält jedoch seine Tourenzahl annähernd bei.

5. Eine wirksamere elektrische Bremsung, mit welcher der Motor nahezu zum Stillstand gebracht werden kann, wird erzielt, indem man den Anker über einen Widerstand kurzschließt, während das Feld vom Netz aus voll erregt bleibt.

Durch die angegebenen Eigenschaften ist das Verwendungsgebiet der Nebenschlußmotoren bestimmt. Man wird sie vor allem überall da anwenden, wo es darauf ankommt, bei variablem Drehmoment eine konstante Tourenzahl beizubehalten oder eine vom Drehmoment unabhängige Tourenregulierung zu erzielen. Nebenschlußmotoren werden daher gebraucht zum Antrieb von Werkstätten und einzelnen Werkzeugmaschinen (Gruppenantrieb und Einzelantrieb), für Papier- und Druckereimaschinen, für Pumpen und Ventilatoren usw. Ferner wird der Nebenschlußmotor oft auch bei Hebezeugen angewandt, bei denen eine plötzliche Entlastung und Umkehrung der Kraftrichtung vorkommen kann (z. B. für Aufzüge).

Bei Elektromotoren, welche auf die Transmission von Werkstätten arbeiten, wird man im allgemeinen nur einen Anlaßwiderstand brauchen und in den meisten Fällen auf einen besonderen Regulierwiderstand vollständig verzichten können. Beim Einzelantrieb von Werkzeugmaschinen kann man die für diese meist erforderliche Geschwindigkeitsänderung durch Zwischenschaltung einer Übersetzung, z. B. durch Stufenscheiben, erzielen; zweckmäßiger wird man jedoch die vorteilhaften Eigenschaften der Elektromotoren ausnutzen, indem man direkten Antrieb wählt und die

Digitized by Google

Geschwindigkeit der Motoren ändert (siehe Kapitel 28). Hierdurch ergibt sich eine sehr bequeme Handhabung und eine große Ersparnis an Arbeitszeit, indem das zeitraubende Umlegen der Riemen vermieden wird.

102. Motoren für konstante Klemmenspannung und Hauptschlußerregung.

Die allgemeinen Gleichungen für Drehmoment und Tourenzahl

$$\vartheta = \frac{g_m \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot \frac{p}{a} N \Phi J_a$$

$$n = 60 \cdot 10^8 \frac{a}{p} \frac{1}{N} \frac{E_a}{\Phi}$$

gelten auch für Hauptschlußmotoren, es ist jedoch der Kraftfluß Φ von der Stromstärke J_a abhängig. Die Stromstärke beeinflußt daher das Drehmoment in doppelter Hinsicht, und die Tourenzahl ist hier nicht wie bei Nebenschlußmotoren von der Ankerstromstärke bezw. vom Drehmoment unabhängig, sondern nimmt mit wachsendem Drehmoment bezw. steigender Stromstärke ab; es tritt also bei Hauptstrommotoren eine gewisse Selbstregulierung der Tourenzahl ein.

Um einen Überblick zu geben, für welche Betriebe die Verwendung eines Hauptschlußmotors besondere Vorteile bietet, seien hier noch einmal seine Haupteigenschaften kurz zusammengestellt.

1. Die Tourenzahl eines Hauptschlußmotors mit konstanter Klemmenspannung ist abhängig von dem Drehmoment, welches er ausüben muß. Bei großem Drehmoment läuft er langsam, bei Leerlauf geht er durch.

2. Das Drehmoment bezw. die Anzugskraft wird von der Ankerstromstärke in doppelter Weise beeinflußt ($\vartheta = C \Phi J$) und ist für geringe Sättigungen dem Quadrat der Stromstärke proportional. Bei gleicher Größe hat daher ein Hauptstrommotor eine bedeutend größere Anzugskraft als ein Nebenschlußmotor.

3. Ein Konstanthalten der Tourenzahl durch Regulierung ist viel schwerer zu erreichen, als bei einem Nebenschlußmotor (siehe Kapitel 29).

4. Der Hauptschlußmotor kann keinen Strom in das Netz zurückliefern.

5. Zur elektrischen Bremsung ist eine Umschaltung der Feldspulen oder des Ankers notwendig.

6. Der Hauptstrommotor besitzt eine größere Überlastungsfähigkeit als der Nebenschlußmotor ohne künstliche Kommutation,

Digitized by Google

da bei ihm das kommutierende Feld mit wachsender Ankerstromstärke ebenfalls zunimmt.

Nach dem Vorhergehenden charakterisiert sich der Hauptstrommotor als besonders geeignet für Betriebe, bei welchen es hauptsächlich auf ein großes Anzugsmoment ankommt, wie beim Kranbetrieb und beim Betrieb elektrischer Bahnen. Hier bietet der Hauptstrommotor außerdem noch den Vorteil einer automatischen Geschwindigkeitsregulierung, da er z. B. beim Anheben großer Lasten langsamer läuft als bei kleiner Belastung.

Der Kranbetrieb ist ein stark intermittierender Betrieb, bei welchem außerdem oft augenblickliche Überlastungen vorkommen. Die Motoren werden durch das häufige Anlassen, Anhalten und Umsteuern sehr stark beansprucht; es kommt bei ihnen daher viel weniger auf einen guten Wirkungsgrad, als auf große Überlastungsfähigkeit, das heißt gute Kommutations- und Abkühlungsverhältnisse an. Ferner sind sie wegen der häufigen und starken Stöße, denen sie ausgesetzt sind, mechanisch besonders fest zu konstruieren. Das Anlassen und die Tourenregulierung geschieht meist unter Verwendung von Widerständen, und zwar kommen wegen der Umkehrung der Drehrichtung, die dieser Betrieb erfordert, besonders die Umkehranlaßapparate, welche auf S. 457 beschrieben sind, zur Anwendung.

Die Anforderungen, welche an Straßenbahnmotoren zu stellen sind, sind ganz ähnlich wie bei Kranmotoren.

103. Motoren für konstante Klemmenspannung und Doppelschlußerregung.

Die Doppelschlußmotoren nähern sich in ihren Haupteigenschaften je nach dem Maß der Kompoundierung mehr den Nebenschlußmotoren oder mehr den Hauptschlußmotoren; man hat dieselben daher entweder aufzufassen als kompoundierte Nebenschlußmotoren oder als mit Nebenschlußwicklung versehene Hauptstrommotoren. In die erste Kategorie gehören die Nebenschlußmotoren, welche zur Erhöhung der Anzugskraft während des Anlaufs mit einer Kompoundwicklung versehen sind, die jedoch meist, sobald die volle Geschwindigkeit erreicht ist, ausgeschaltet wird. Ferner kann eine Kompoundierung, wie in Bd. I, S. 616 ausgeführt wurde, zum Konstanthalten der Tourenzahl von Nebenschlußmotoren dienen. Hauptschlußmotoren werden manchmal mit Nebenschlußwicklung versehen, um ein Durchgehen bei Entlastung zu verhindern (s. Bd. I, S. 619).

Digitized by Google

Fünfundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren und Motoren für konstante Stromstärke. Kraftübertragungssystem Thury.

104. Generatoren für konstante Stromstärke. — 105. Motoren für konstante Stromstärke. — 106. Kraftübertragungssystem Thury.

104. Generatoren für konstante Stromstärke.

Bei Generatoren, bei welchen man die Stromstärke für alle Belastungen konstant halten will, muß sich die Klemmenspannung proportional mit der Belastung ändern. Da die Klemmenspannung annähernd gleich der induzierten EMK

$$E_a = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi\, 10^{-8}$$

ist, so sieht man, daß eine allmähliche Änderung der Klemmenspannung nur möglich ist durch Änderung des Kraftflusses Φ oder der Tourenzahl n.

Beide Methoden werden angewendet. Eine Änderung des Kraftflusses kann entweder durch Änderung der Erregung oder durch Verstellen der Bürsten erreicht werden. Verstellt man die Bürsten aus der neutralen Zone, so ändert sich der Kraftfluß Φ aus zwei Gründen, erstens weil die entmagnetisierenden Ankeramperewendungen sich ändern und zweitens, weil der Teil des Hauptkraftflusses, welcher die kurzgeschlossene Spule durchsetzt, kleiner wird.

Das Konstanthalten der Stromstärke durch Änderung der Tourenzahl hat so zu erfolgen, daß die Tourenzahl proportional der jeweiligen Leistung geändert wird. Bei dieser Regulierung muß somit, wenn man von der Änderung des Wirkungsgrades der Maschine mit der Belastung absieht, das Drehmoment der Antriebsmaschine konstant bleiben. Annähernd wird diese Bedingung erfüllt durch Dampfmaschinen, welche ohne Regulierung mit konstanter Füllung arbeiten und Turbinen mit konstanter Beaufschlagung.

Digitized by Google

Ganz genau ist diese Regulierung jedoch nicht, da sich der Wirkungsgrad eines Aggregates mit der Geschwindigkeit und der Belastung ändert, es muß daher die Tourenzahl auch noch von Hand oder durch Automaten nachreguliert werden. Die Regulierung der Klemmenspannung durch Änderung der Tourenzahl ist die bequemste und sicherste und auch mit Rücksicht auf eine funkenfreie Kommutation die beste. Da der Ankerstrom, die Feldverteilung und die Bürstenstellung bei dieser Regulierung für alle Belastungen unverändert bleiben, so kann man die Bürsten so einstellen, daß für jede Belastung die Kurzschlußspannung gleich Null wird.

105. Motoren für konstante Stromstärke.

Das Drehmoment eines Motors kann man gleich setzen:

$$\vartheta = C g_m \Phi J.$$

Will man einen Motor mit konstanter Stromstärke und konstanter Tourenzahl betreiben, so muß sich das Drehmoment ϑ und somit auch annähernd der Kraftfluß Φ proportional mit der Belastung ändern.

Die Änderung des Kraftflusses kann hier ebenfalls durch Änderung der Erregung oder durch Verstellung der Bürsten erfolgen.

Das größte Drehmoment und somit die größte Leistung erhält man, wenn Φ seinen Maximalwert aufweist. Dies ist der Fall, wenn die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone stehen und die Felderregung ein Maximum hat. Eine Überlastung der Motoren ist somit in keinem Fall möglich. Steigt die Belastung über den Höchstwert der Motorleistung, so fällt die Tourenzahl ab, bis allenfalls das Steigen des Wirkungsgrades g_m die Überwindung der Belastung möglich macht, oder die Maschine kommt zum Stillstand. Hierbei ist jedoch, da die Stromstärke nicht anwächst, eine Beschädigung der Motoren nicht zu befürchten.

106. Kraftübertragungssystem Thury.

Das von der Compagnie de l'Industrie Electrique in Genf ausgebildete und in mehreren Fällen in großem Maßstabe ausgeführte Kraftübertragungssystem Thury ist ein reines Seriesystem mit konstanter Stromstärke. Die Generatoren und Motoren sind als Hauptschlußmaschinen für konstanten Strom ausgebildet und werden alle hintereinander geschaltet.

Ist die gesamte Leistung der Primärstation in Watt (W) ge-

Digitized by Google

geben und die konstant zu haltende Stromstärke (J) gewählt, so ist auch die gesamte maximale Spannung

$$P_{max} = \frac{W}{J}$$

festgelegt.

Diese Spannung beträgt bei ausgeführten Anlagen bis 58000 Volt. Eine so hohe Spannung kann in einem Generator nicht erzeugt werden; die gesamte Leistung W muß daher auf so viele Generatoren verteilt werden, daß die gewünschte Grenze nicht überschritten wird.

Um möglichst wenige und große Generatoren zu erhalten, wird man die Stromstärke J und die maximale Spannung eines Generators möglichst groß wählen.

Die Stromstärke J wird einerseits begrenzt durch die Leitungsverluste bezw. den Aufwand an Kupfer für die Fernleitung und andererseits durch die verlangte Leistung der kleinsten Motoren. Für die maximale Spannung eines Generators wird durch die zulässige Spannungsdifferenz zwischen benachbarten Kommutatorlamellen und die Schwierigkeiten der Isolierung eine Grenze gezogen. Die Compagnie de l'Industrie Electrique hat größere Maschinen bis zu 4000 Volt ausgeführt, und bis zu 3600 Volt liegen mehrfache Ausführungen vor, die seit einer Reihe von Jahren im Betriebe sind. Die konstruktive Ausbildung eines Hochspannungsgenerators ist auf S. 177 beschrieben.

Durch die Maximalspannung und die gewählte Stromstärke ist die Höchstleistung des Generators festgelegt. Steht die Leistung der Primärstation zu der Entfernung, auf welche die Leistung übertragen werden soll, bezw. zu der aus wirtschaftlichen Gründen erforderlichen maximalen Gesamtspannung in einem ungünstigen Verhältnis, so erhält man Generatoren von kleinen Leistungen. Um in solchen Fällen wenigstens für die Triebmaschinen größere Einheiten zu bekommen, hilft man sich dadurch, daß man mehrere Generatoren auf eine Welle setzt und sie gemeinschaftlich antreibt. Für die Regulierung auf konstante Stromstärke sind alle in Abschnitt 104 und 105 angegebenen Methoden anwendbar. Wenn irgendwie möglich, so wird die Regulierung durch Änderung der Tourenzahl bewirkt. Ist dies nicht möglich, so reguliert Thury von Vollast bis $^2/_3$ Belastung durch Nebenschließung der Hauptschlußwicklung und von $^2/_3$ Belastung bis Leerlauf durch Verstellung der Bürsten. Eine Schwächung des Feldes unter $^2/_3$ der Belastung scheint bei diesen Maschinen, infolge ihrer großen Ankerlänge und daher großer Reaktanzspannung, Funkenbildung zu veranlassen.

Digitized by Google

Die Regulierung wird automatisch durch ein Stromsolenoid betätigt, das sich bei Anwachsen oder Abnehmen der Stromstärke in der einen oder anderen Richtung bewegt und dadurch als Relais eine Bewegung der Reguliervorrichtung mit Servomotor in dem einen oder anderen Sinne einleitet. In der ETZ 1905, S. 824 sind verschiedene dieser Regler beschrieben. Beim Antrieb durch Wasserturbinen wird die Regulierung allgemein durch Änderung der Tourenzahl vorgenommen. Der Regulierungsmechanismus ist hier so angeordnet, daß das Stromrelais einen Reguliermotor betätigt, welcher auf eine horizontale Welle, die längs des ganzen Turbinenhauses von Turbine zu Turbine führt, wirkt. Die Welle beeinflußt die Servomotoren, welche bei jeder Turbine die Geschwindigkeit regeln.

Die größte und neueste nach diesem System ausgeführte Anlage ist die Kraftübertragung Moutiers-Lyon.[1]) Die Anlage ist seit April 1906 im Betrieb. Die verfügbare Leistung von 6300 PS wird mittelst Luftleitung auf eine Entfernung von 180 km übertragen.

Die Stromstärke wurde zu 75 Amp. gewählt, wodurch die Spannung zwischen den Leitungen bei Vollast sich zu 57600 Volt ergibt. Diese Spannung könnte noch verdoppelt werden, indem man die Mitte der Generatorenreihe erdet, wodurch zwischen Erde und Leitung nur die halbe Leitungsspannung auftritt. Im Kraftwerk sind 4 Einheiten à 1570 PS bei maximal 300 Umdrehungen pro Minute aufgestellt. Jede Einheit ist mit zwei Doppelmaschinen gekuppelt. Es sind somit insgesamt 16 Generatoren vorhanden, und die Maximalspannung eines Generators beträgt 3600 Volt. Die Änderung der Klemmenspannung geschieht nur durch Tourenregulierung.

Für jede Maschineneinheit ist eine Bedienungssäule angebracht, auf welche der als Kurzschließer ausgebildete Hauptunterbrecher und der Strom- und Spannungsmesser untergebracht sind. Außerdem erhält die Säule noch zwei in Reihe zwischen den Polen des Maschinensatzes geschaltete Hörner-Blitzableiter.

Auf der Hauptschalttafel sind nur die Apparate für das Anlassen und die Regulierung und ferner der Spannungs- und Strommesser, der Zähler und der Hauptkurzschluß-Unterbrecher untergebracht.

Die Umformung geschieht in zwei Empfangsstationen, von welchen die eine 3 Motoren à 720 PS und die andere 5 Motoren à 720 PS umfaßt. Die Motoren laufen mit 428 Touren. Jeder Motor besteht aus einer Doppelmaschine. Die Konstanthaltung der Tourenzahl geschieht lediglich durch Verstellung der Bürsten. Bei

[1]) ETZ 1906, S. 1091.

Digitized by Google

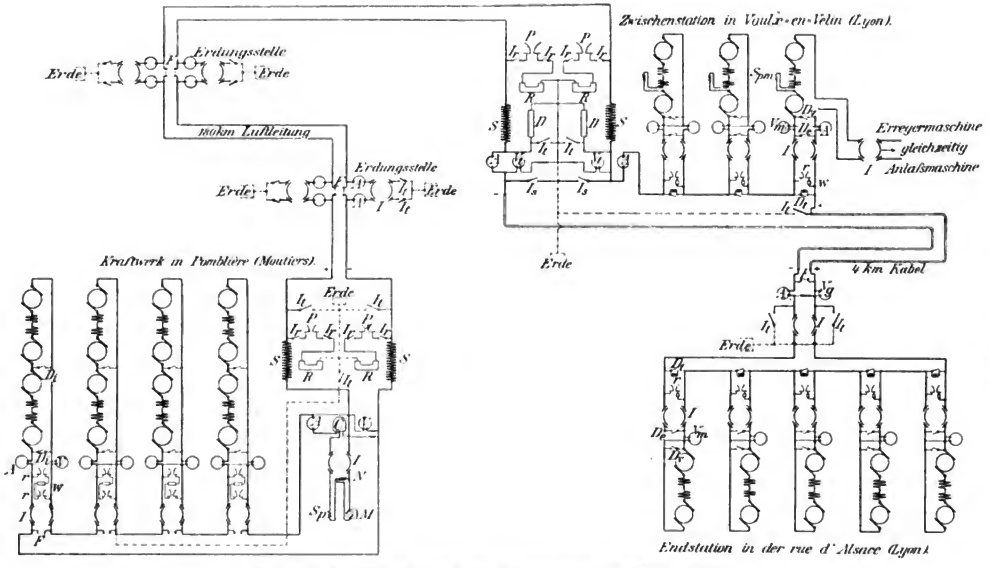


Fig. 440. Schaltungsschema der Kraftübertragung Moutiers-Lyon.

J = Stromunterbrecher.
J_r = Unterbrecher für die Blitzableiter.
J_t = Unterbrecher für die Erdleitung.
J_t = Abteilungsunterbrecher.
D = Entladevorrichtung.
P = Blitzableiter d. Fernleitung.
r = Blitzableiter f. d. Maschinen.
R = Wasserwiderstand.
w = Induktionsfreier Widerstd.
S = Induktionsspulen.
D_t = Vorrichtung um eine Gruppe spannungslos zu machen.
D_v = Vorrichtung zur Geschwindigkeitsverminderung.
D_r = Sicherheitsvorrichtung gegen Umkehrung.
D_t = Kohlenausschalter.
F = Sicherheitsvorrichtung.
V_m = Maschinenspannungsmesser.
V_t = Erdungsspannungsmesser.
V = Hauptspannungsmesser.
C = Zähler.
A = Strommesser.
N = Zweigwiderstand für die Regulierung.
S_p = Regelungsspule für die Dynamo.
M = Regelungsmotor.
S_{pm} = Regelungsspule für die Motoren.

Digitized by Google

Leerlauf stehen die Bürsten unter der Polmitte, bei Vollast in der neutralen Zone. Jede Motorengruppe ist mit einem Paar schwerer Schwungräder versehen, um bei heftigen Belastungsschwankungen keine merklichen Geschwindigkeitsänderungen zu erhalten.

Die Blitzschutzvorrichtungen sind sehr sorgfältig ausgebildet. Fig. 440 zeigt das Schaltungsschema der Anlage.

Die Inbetriebnahme und Außerbetriebsetzung der Generatoren ist äußerst einfach. Bei der Inbetriebnahme wird der Generator zunächst mittelst des Schalters J in sich kurzgeschlossen; der Schalter (Fig. 441) steht dabei in der gezeichneten Stellung I. Hierauf wird der Turbinenschieber ein wenig geöffnet und der Generator auf eine Tourenzahl gebracht, bei welcher er einen Kurzschlußstrom, der gerade gleich dem konstanten Netzstrom ist, erzeugt. Er läuft dabei natürlich noch sehr langsam. Ist die richtige Stromstärke erreicht, so wird der Generator durch Drehung des Schalters um 90° (Stellung II) in den Stromkreis eingeschaltet; seine Stromstärke und Spannung bleiben dabei vollständig unverändert und die Antriebsmaschine hat allein die inneren Verluste zu decken. Um den Generator zu belasten, wird dann durch allmähliches Erhöhen der Tourenzahl seine Spannung erhöht. Die Stromstärke wird dabei durch den Regler konstant gehalten, indem die Tourenzahl der anderen Sätze so reguliert wird, daß die Spannung der anderen Generatoren entsprechend sinkt. Hat der zugeschaltete Generator die richtige Spannung erreicht, so wird der Regulierapparat des Maschinensatzes an den Zentralapparat angekuppelt und die Inbetriebsetzung ist beendigt.

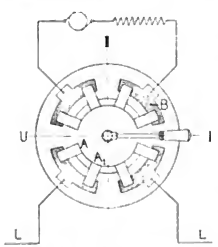


Fig. 441. Umschalter J.

Bei Außerbetriebsetzung wird der Regulierapparat wieder abgetrennt, die Tourenzahl der Turbine herabgesetzt und der Generator in sich kurzgeschlossen und vom Netze abgeschaltet. Sobald die Antriebsmaschine soweit herunter reguliert ist, daß sie die Verluste im Generator nicht mehr decken kann, würde dieser von den anderen Generatoren aus als Motor in umgekehrter Drehrichtung angetrieben werden. Um dies zu verhüten, ist der in Fig. 442 dargestellte Kurzschließer vorgesehen, dessen Lage im Schema mit D_r bezeichnet ist. Am Wellenende der Generatoren ist eine Daumenscheibe a angebracht; bei richtigem Drehsinn (Pfeilrichtung) bewegt diese sich frei; sobald jedoch die Drehrichtung

Digitized by Google

sich umkehrt, setzt sie die Auslösevorrichtung *b* in Bewegung und gibt so den selbsttätigen Schalter *c* frei; dieser klinkt dann ein und schließt die Maschine kurz.

Auch die Inbetriebsetzung der Motoren geht bei dem Seriesystem äußerst einfach vonstatten. Im allgemeinen werden die Motoren einfach in den Stromkreis eingeschaltet; sie laufen dann allmählich an, wobei sich mit dem Anwachsen der Geschwindigkeit ihre Spannung von selbst erhöht. Bei Leerlauf des Motors stellt der Regulierungsmechanismus die Bürsten so ein, daß die Spannung des Motors gerade ausreicht, um die Leerlaufsverluste zu decken. Bei Belastung des Motors werden die Bürsten mehr und mehr nach der geometrisch-neutralen Zone bewegt.

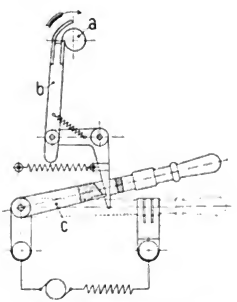


Fig. 442. Kurzschließer D_r.

Das Abstellen der Motoren geschieht durch ihre Kurzschließung. Beide Schaltungen werden mit dem bereits bei den Generatoren erwähnten Umschalter *J* (Fig. 441) vorgenommen. Bei großen Motoren von über 100 PS würden, wenn man den Kurzschluß des Motors am Umschalter selbst aufheben wollte, wegen der großen Selbstinduktion des Motors am Umschalter Funken auftreten. Hier wird deshalb (siehe Fig. 440) außer dem Umschalter *J* noch der selbsttätige Kohlenausschalter D_e angebracht, der in Fig. 443 schematisch dargestellt ist. In der gezeichneten Stellung schließt dieser den Motor kurz. Sobald nun der Umschalter *J* in die Stellung II gebracht wird, fließt ein Strom durch die Spule *S* des Kohlenausschalters, und erst jetzt wird der Kurzschluß des Motors durch Auseinanderziehen der Kohlen aufgehoben und der Motor setzt sich in Gang. Der Lichtbogen entsteht auf diese Weise an den Kohlen und der Umschalter *J* bleibt unbeschädigt.

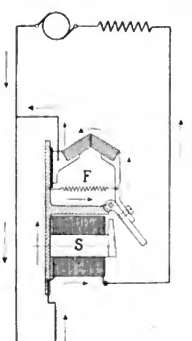


Fig. 443. Kohlenausschalter D_e.

Um ein Durchgehen des Motors zu verhüten, ist jeder Motorsatz mit einer Geschwindigkeits-Ausrückung versehen, die ihn kurz-

Digitized by Google

schließt, sobald die Umdrehungszahl die normale um 15—20% überschreitet. Bei anderen Anlagen hat Thury zur Sicherung der Motoren einen Automaten vorgesehen, welcher den Motor kurzschließt, sobald die Spannung an den Motorklemmen eine zu große wird.

Das beschriebene System hat gegenüber der Kraftübertragung mittelst Wechselstrom eine Reihe von Vorzügen, welche seine Anwendung für bestimmte Fälle vorteilhaft erscheinen lassen. Namentlich kann es in Betracht kommen, wo es sich um Übertragung größer Leistungen von einem Punkte zu einem anderen handelt, wo also der primären Zentrale eine sekundäre Zentralstation gegenübersteht. Zur Übertragung kleinerer Leistungen auf große Entfernung eignet es sich nicht, da es eine Unterteilung der Stromerzeuger und -verbraucher bedingt, welche in diesen Fällen nicht angängig ist.[1])

[1]) Siehe auch Elektrotechnik und Maschinenbau. 1907, S. 473. Kritische Betrachtungen über das System der elektrischen Kraftübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom.

Digitized by Google

Sechsundzwanzigstes Kapitel.

Generatoren und Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke. Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke.

107. Generatoren zum Laden von Akkumulatoren. — 108. Zusatzmaschinen. — 109. Sonstiges Verwendungsgebiet der Generatoren für veränderliche Spannung und Stromstärke. — 110. Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke. — 111. Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke.

107. Generatoren zum Laden von Akkumulatoren.

Sollen die Generatoren in elektrischen Anlagen außer zum Arbeiten auf das Netz zeitweise auch zum Aufladen von Akkumulatorenbatterien verwendet werden, so muß zu diesem Zwecke ihre Spannung um ca. 30 bis 40% gegenüber der Netzspannung erhöht werden können. Die Ladestromstärke wird dabei möglichst konstant gehalten, da dies für die Akkumulatoren am günstigsten ist; sie ist in den meisten Fällen bedeutend geringer als die normale Stromstärke, welche die Maschinen beim Arbeiten auf das Netz liefern können. Auch mit Rücksicht auf die Antriebsmaschinen muß sie in der Regel herabgesetzt werden, um bei der Erhöhung der Spannung eine Überlastung zu vermeiden.

Die Erhöhung der Spannung kann, falls die Antriebsmaschine dies gestattet, durch Erhöhung der Tourenzahl der Maschinen oder bei konstanter Tourenzahl durch Verstärkung der Erregung erreicht werden. Bei Anwendung der ersten Methode ist bei dem Entwurf der Generatoren zu berücksichtigen, daß sie bei der Erhöhung der Tourenzahl mechanisch stärker beansprucht werden und daß infolge der Verringerung der Kurzschlußzeit die funkenfreie Kommutation erschwert wird. Die Nachrechnung in bezug auf Funkenbildung muß daher für die maximale Geschwindigkeit vorgenommen werden, und es ist zu erwägen, ob Wendepole nötig sind. Günstig wirkt

Digitized by Google

in dieser Beziehung, daß gleichzeitig mit der Erhöhung der Tourenzahl auch die Spannung bezw. die Erregung steigt.

In den meisten Fällen wird jedoch eine Erhöhung der Tourenzahl nicht oder nur in geringem Grade möglich sein. Es ist dann der Generator so zu entwerfen, daß er beim Arbeiten auf das Netz befriedigend funktioniert und außerdem eine Spannungserhöhung um den notwendigen Betrag von 30 bis 40% zuläßt. Die Charakteristik der Maschine muß daher über dem Knie, auf dem man bei normaler Spannung arbeitet, noch möglichst stark ansteigen; man erhält sonst für die maximale Spannung, die zum Laden der Akkumulatoren notwendig ist, zu viel Amperewindungen, muß also, um diese Spannung zu erreichen, sehr viel Erregerkupfer auf die Magnete aufbringen, das beim Arbeiten mit normaler Spannung nicht ausgenutzt wird und die Maschine verteuert.

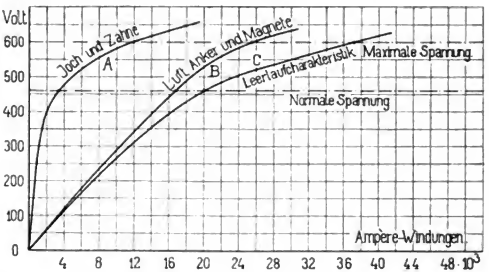


Fig. 444. Leerlaufcharakteristik einer Maschine zum Laden von Akkumulatoren.

Um diese Forderung zu erfüllen, schlägt man folgenden Weg ein. Man sättigt das Ankereisen und die Magnetkerne für normale Spannung wenig; den Anker je nach der Periodenzahl bis zu $B_a = 10000$, die Magnete etwa mit $B_m = 12000$. Dagegen sättigt man die Zähne schon bei normaler Spannung stark, indem man B_z zu 19000 bis 20000 annimmt, und verwendet ferner ein Gußjoch, das man bei normaler Spannung ziemlich stark, etwa mit $B_j = 5000$ bis 7000, beansprucht. Die Magnetisierungskurve für Luft, Anker und Magnete allein wird dann bei der normalen Spannung noch ziemlich geradlinig verlaufen (Fig. 444, Kurve *B*); dagegen wird man auf der Magnetisierungskurve für Joch und Zähne (Kurve *A*) schon bei normaler Spannung über dem Knie arbeiten. Kurve *A* steigt jedoch auch über dem Knie noch stark an, da die

Digitized by Google

Magnetisierungskurve für Gußeisen nicht so stark abbiegt, wie die für Stahlguß (siehe Tafel VIII) und da die Zähne nur ein sehr kurzes Stück des Kraftlinienweges bilden und sich die Induktion dieses Stückes daher ohne einen zu großen Aufwand von Erregerstrom auch über den Sättigungspunkt hinaustreiben läßt. Die Leerlaufcharakteristik *C*, welche man durch Summieren der Abszissen von *A* und *B* erhält, wird daher bei der normalen Spannung infolge des Einflusses von *A* schon genügend gekrümmt sein, und andererseits doch noch stark genug ansteigen, um bei der maximalen Ladespannung nicht allzuviel Erregerkupfer zu erfordern.

Die Maschinen mit starker Veränderung der Erregung haben jedoch den Nachteil, daß beim Arbeiten mit normaler Spannung das Material nicht vollständig ausgenutzt wird und daß sich bei normaler Spannung ein verhältnismäßig großer Spannungsabfall ergibt, da die Charakteristik hier natürlich nur schwach gebogen sein kann. Die Maschinen werden daher verhältnismäßig groß und teuer und es wird im allgemeinen zweckmäßiger sein, die Generatoren für normale Netzspannung gut zu sättigen und die Spannung durch Zusatzmaschinen zu erhöhen.

108. Zusatzmaschinen.

Unter Zusatzmaschinen versteht man Maschinen, die in den Hauptstromkreis eingeschaltet werden und dazu dienen, die Spannung zu ändern. Man braucht sie für verschiedene Zwecke, und dementsprechend ist auch ihre Anordnung und Erregungsart verschieden.

Am häufigsten werden Zusatzmaschinen als Spannungserhöher beim Laden von Akkumulatoren verwendet. Sie werden dabei in den Ladestromkreis eingeschaltet (Fig. 445) und dienen dazu, die Ladespannung beim Fortschreiten der Ladung entsprechend dem Ansteigen der elektromotorischen Gegenkraft der Batterie zu erhöhen. Die maximale Spannung, welche sie zu liefern haben, beträgt 30 bis 40% der Entladespannung der Batterie.

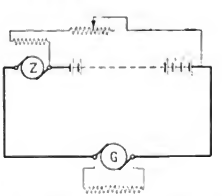


Fig. 445. Zusatzmaschine zum Laden von Akkumulatoren.

Da die Ladestromstärke der Akkumulatoren während der ganzen Ladezeit möglichst konstant gehalten werden soll, sind die Generatoren so zu entwerfen, daß sie bei konstanter Stromstärke Spannungen von annähernd Null bis zur Maximalspannung erzeugen können. Wie Fig. 445 zeigt, werden die Maschinen von der Batterie aus erregt,

Digitized by Google

wodurch bis zu einem gewissen Grade eine automatische Spannungsregulierung erreicht wird, da der Erregerstrom mit zunehmender Batteriespannung steigt; außerdem ist im Erregerkreis noch ein Regulierwiderstand vorzusehen, welcher gestattet, die Erregung beim Beginn des Ladens stark zu vermindern und während des Ladens die Zusatzspannung so zu regulieren, daß die Ladestromstärke konstant bleibt.

Bei der Berechnung von Zusatzmaschinen ist besonders zu beachten, daß sie bei äußerst geringer Erregung den vollen Ladestrom führen, und daß daher eine verhältnismäßig große Stromstärke ohne Feld kommutiert werden muß. Sie müssen daher die Forderung erfüllen, daß sie von Kurzschluß bis Vollast funkenfrei arbeiten. Im übrigen bietet die Berechnung, welche unter Zugrundelegung der maximalen Spannung und der Ladestromstärke zu erfolgen hat, keine weiteren Besonderheiten.

Die im Abschnitt 99 ausführlich beschriebene Querfelddynamo von Rosenberg bildet eine selbsttätige Zusatzmaschine. Wird die Maschine mit konstanter Tourenzahl angetrieben, so läßt sie bei sehr verschiedenen Spannungen einen nahezu konstanten Strom durch. Beim Fortschreiten der Ladung der Batterie nimmt mit zunehmender Batteriespannung die Spannung der Maschine selbsttätig zu, indem die Stromstärke nur um einen kleinen Prozentsatz sinkt.

Die Hauptschlußzusatzmaschine wird wegen ihrer besonderen Eigenschaften in vielen Fällen angewendet. Treibt man eine schwach gesättigte Hauptschlußmaschine mit konstanter Tourenzahl an, so ist das Feld und auch die induzierte EMK dem Strome proportional. Auch die äußere Charakteristik (siehe S. 601, Bd. I) ist in diesem Falle nahezu eine Gerade, die unter dem Winkel α, dessen Tangente gleich $\frac{P}{J}$ ist, gegen die Abszissenachse geneigt ist. Eine derartige Maschine erzeugt somit eine dem Strom proportionale Spannungserhöhung. Wird sie in Reihe mit einer Leitung vom Widerstande R_l geschaltet, so verhält sich diese Leitung, als ob ihr Widerstand $R_l - \frac{P}{J}$ wäre. Man berechnet diese Maschine mit einer solchen Sättigung, daß sie bei der höchsten Spannung gerade noch unter dem Knie der Leerlaufcharakteristik arbeitet. Meistens läßt sich ein funkenfreies Arbeiten für alle Belastungen leicht erreichen, da das kommutierende Feld nahezu proportional mit der Belastung wächst. (Vgl. Berechnungsbeispiel Abschnitt 77.) Infolgedessen wird es oft möglich sein, Bürsten mit geringem Übergangswiderstand anzuwenden, wodurch der Wirkungsgrad dieser ge-

Digitized by Google

wöhnlich mit niedriger Spannung arbeitenden Maschinen verbessert wird.

Derartige Hauptschlußzusatzmaschinen werden in Gleichstromzentralen angewendet, in welchen neben der Stromverteilung in der näheren Umgebung noch einige weiter entfernt gelegene Punkte mit Strom zu versorgen sind. Falls man hier sämtliche Speiseleitungen für den gleichen Spannungsabfall berechnen wollte, so würde man für die längeren Leitungen unwirtschaftlich große Querschnitte erhalten. Man wählt deshalb den Querschnitt der längeren Leitung kleiner und kompensiert einen Teil ihres Widerstandes durch Einschaltung einer Hauptschlußzusatzmaschine (Booster) in die Leitung.

Auch können sie nach einem Vorschlage von G. Kapp im Bahnbetriebe benutzt werden, wo sie in die sogenannten Rückspeisekabel (Leitungen, die an entfernte Schienenpunkte angeschlossen werden, um den Rückstrom aufzunehmen) eingeschaltet werden. Die Rückspeiseleitungen dienen dazu, den Spannungsunterschied zwischen Schienen und Erde zu verkleinern und somit die schädlichen Erdströme zu verringern. Durch Einschaltung einer Hauptschlußzusatzmaschine wird das Potentialgefälle in den Rückspeiseleitungen künstlich erhöht und man kann mit verhältnismäßig kleinen Querschnitten dieser Leitungen noch eine gute Wirkung erzielen.

Ein weiteres Verwendungsgebiet finden die Zusatzmaschinen in neuerer Zeit zur Vergrößerung der Pufferwirkung von Batterien. Dieses Gebiet ist ausführlich in Kapitel 27 erörtert.

109. Sonstiges Verwendungsgebiet der Generatoren für veränderliche Spannung und Stromstärke.

Die Anwendung dieser Generatoren kommt weiter noch bei Anlaß- und Regulieraggregaten (Abschn. 120, S. 518) und bei Hauptstromkraftübertragungen in Betracht (Abschn. 111, S. 501 und Bd. I, Abschn. 155, S. 620). Bei den Generatoren letzterer Verwendung stehen Spannung und Stromstärke in einer gewissen Abhängigkeit zueinander, indem bei zunehmender Stromstärke auch die Spannung zunimmt. Sie sind somit in dieser Beziehung günstig in bezug auf funkenfreie Kommutation.

Die Generatoren der Anlaß- und Regulieraggregate müssen ihre höchste Stromstärke und auch starke Stromstöße bei jeder Spannung (auch im Kurzschluß) abgeben. Diese Maschinen sind somit mit großer Sorgfalt zu bemessen. Im allgemeinen wird man bei ihnen künstliche Mittel zur Erreichung einer funkenfreien Kommutation anwenden müssen. Man findet sie sowohl mit Wendepolen, als auch mit Kompensationswicklung ausgeführt. (Siehe auch Abschn. 120.)

Digitized by Google

110. Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke.

Zu diesen gehören hauptsächlich Motoren, welche von Anlaß- und Regulieraggregaten (Abschn. 120, S. 518) gespeist werden und Motoren für Hauptstromkraftübertragungen (Abschn. 111). Ferner ist zu erwähnen, daß die in Abschn. 114 beschriebenen Zusatzmaschinen für Pufferbatterien zeitweise generatorisch und zeitweise motorisch arbeiten. Die Motoren, welche von besonderen Aggregaten gespeist werden, sind meistens Fördermotoren, Motoren zum Antrieb von Walzenstraßen oder Motoren mit starker Tourenregulierung, z. B. zum Antrieb von Papiermaschinen. Sie werden meistens fremd erregt.

Die Fördermotoren sind starken Belastungsstößen ausgesetzt. Wenn sie direkt mit der Fördertrommel gekuppelt werden, haben sie jedoch eine sehr geringe Tourenzahl (etwa zwischen 25 und 45 Umdr. pro Min.), so daß man bei diesen Maschinen, auch wegen der konstanten Erregung, ohne künstliche Kommutation auskommt.

111. Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke.

Eine der einfachsten elektrischen Kraftübertragungen erhalten wir durch Serieschaltung eines Hauptschlußgenerators mit einem Hauptschlußmotor. Sind zwei oder mehr Generatoren und ebensoviele Motoren vorhanden, so werden sie nach dem Drei- bezw. Mehrleitersystem verbunden.

In Fig. 446 ist ein Schaltungsschema nach einer Ausführung der Maschinenfabrik Oerlikon für zwei Generatoren und zwei Motoren aufgezeichnet.

Die Generatoren werden mit konstanter Tourenzahl betrieben, wodurch auch nahezu konstante Tourenzahl der Motoren erreicht wird; Spannung und Stromstärke sind dabei veränderlich, und es findet keinerlei Regulierung statt. Die Bedingungen und die Arbeitsweise dieser Betriebsart wurden in Abschn. 155, Bd. I, S. 620 erläutert.

Wie aus Fig. 446 hervorgeht, ist an Meßinstrumenten für jeden Generator und Motor nur ein Amperemeter vorhanden. Die Abschaltung erfolgt einpolig. *S* bezeichnet eine Bleisicherung und *B* eine Blitzplatte. Jede Blitzplatte wird entweder für sich geerdet und den Erdplatten zugleich ein großer Abstand gegeben, oder es werden, wenn eine gemeinsame Erdplatte vorhanden ist, Widerstände zwischen jeder Blitzplatte und der Erde eingeschaltet, weil sonst

Digitized by Google

bei gleichzeitiger Tätigkeit von zwei Blitzplatten ein direkter Kurzschluß entstehen würde.

Die Generatoren werden außerdem durch selbsttätige Kurzschließer *K* gegen zu hohe Stromstärken geschützt, die infolge von plötzlichen Überlastungen oder Kurzschlüssen in der Anlage entstehen können. Überschreitet der Strom eine gewisse durch die Spannung einer Feder regulierbare Grenze, so wird der Halter *h* durch den Elektromagneten *E.-M.* angezogen und dadurch der Schalter freigegeben. Der Schalthebel fällt nun infolge seines Gewichtes oder durch eine Feder getrieben nach unten und schließt die Magnetwicklung kurz, so daß die Maschine stromlos wird.

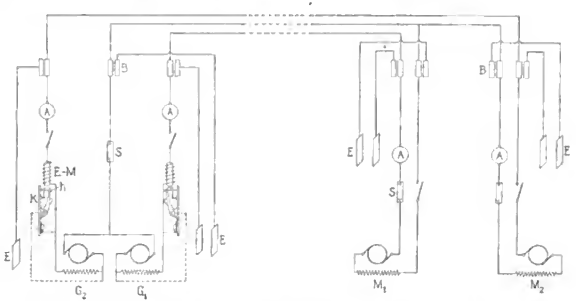


Fig. 446. Schaltungsschema einer Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke.

G_1, G_2 = Hauptschlußgeneratoren.
M_1, M_2 = Hauptschlußmotoren.
K = Kurzschließer.
h = Halter.
$E.-M.$ = Elektro-Magnet.
S = Sicherung.
A = Amperemeter.
B = Blitzplatten.
E = Erde.

Für die Motoren ist eine derartige Schutzvorrichtung nicht erforderlich, da sie nicht generatorisch wirken können und daher bei Kurzschluß stromlos werden.

Arbeiten die Motoren mit anderen Kraftmaschinen, z. B. Dampfmaschinen, parallel auf dieselbe Transmission, so können die Dampfmaschinen und die Motoren von der Transmission aus angetrieben werden, ohne daß der Maschinist in der Primärstation davon in Kenntnis gesetzt wird, da die Motoren (im Gegensatz zu Nebenschlußmotoren) bei unveränderter Drehrichtung nicht generatorisch arbeiten können.

Digitized by Google

Ebenso können die Maschinen der Primärstation ohne Rücksicht auf die Motoren in Gang gesetzt werden; sind die Motoren eingeschaltet, so laufen sie gleichzeitig mit den Generatoren an, sofern sie nicht schon im Gange sind; sind sie nicht eingeschaltet, so bleiben die Generatoren so lange stromlos, bis die Einschaltung erfolgt.

Außer der großen Einfachheit in der Anlage und im Betriebe läßt sich mit der Serie-Kraftübertragung ein hoher Wirkungsgrad erreichen. Der Wirkungsgrad der Generatoren ist bei kleinen Belastungen sehr hoch, da sowohl die Eisenverluste wie die Kupferverluste mit abnehmender Belastung abnehmen, so daß nur die Reibungsverluste als von der Belastung unabhängige Verluste übrbleiben. (S. Abschn. 77, S. 372.)

Die Spannung einer Maschine bei Vollast wird von der Maschinenfabrik Oerlikon je nach der Entfernung bis zu 2000 Volt angenommen, so daß man beim Dreileitersystem zwischen den Außenleitern 4000 Volt erhält. Jedoch lassen sich die Generatoren leicht bis zu 3500 Volt Klemmenspannung ausführen.

Bei der bekannten Anlage Kriegstetten-Solothurn, welche die erste mit praktischem Erfolge ausgeführte Anlage dieser Art darstellt, wird bei einer Gesamtspannung von 2500 Volt eine Leistung von 50 PS auf 8 km Entfernung übertragen. In der Primärstation sind zwei Generatoren von je 18 KW aufgestellt. Der Gesamtwirkungsgrad der Übertragung beträgt 75 %. Sie wurde im Jahre 1886 nach den Entwürfen von C. L. Brown von der Maschinenfabrik Oerlikon ausgeführt.[1])

Bemerkenswert ist ferner die von der Compagnie de l'Industrie Electrique, Genf, ausgeführte Kraftübertragung Frinvillier-Biberist. Es wird hier eine Leistung von 240 KW mit einer Spannung von 6000 Volt auf eine Entfernung von 28 km übertragen. Die Fernleitung besteht aus Kupferdraht von 7 mm Durchmesser. In der Primärstation sind zwei durch eine Girard-Turbine von 360 PS angetriebene Generatoren für 3000 Volt, 40 Ampere und 200 Umdrehungen aufgestellt.

[1]) El. Rev. Bd. XX, S. 253; ETZ 1887, S. 229.

Digitized by Google

Siebenundzwanzigstes Kapitel.

Ausgleich stark veränderlicher Belastungen durch Puffersysteme.

112. Allgemeines. — 113. Wirkungsweise einer Pufferbatterie. — 114. Anwendung von Zusatzmaschinen bei Pufferbatterien. — 115. Wirkungsweise der Pufferaggregate. — 116. Verfahren zur Tourenänderung des Puffermotors. — 117. Konstruktive Durchbildung des Pufferaggregates.

112. Allgemeines.

Die Aufgabe, einem Netz bei stark schwankender Belastung Energie in konstanter Höhe zu entnehmen, so daß das Netz die Belastungsstöße nur wenig empfindet, wurde hauptsächlich auf zwei Arten gelöst. Erstens durch Anordnung von Pufferbatterien, zweitens durch Anordnung von Pufferaggregaten. Letztere bestehen im wesentlichen aus einem Umformeraggregat, auf dessen Welle sich ein Schwungrad befindet. Das Prinzip beider Ausgleichsysteme ist das gleiche: bei der mittleren Belastung leistet nur das Netz Arbeit; steigt die Belastung über ihren mittleren Wert, so wird das Puffersystem mit zur Arbeitslieferung herangezogen, während es bei Belastungen, die kleiner sind als die mittlere, geladen wird, d. h. Arbeit vom Netz aufnimmt. Der prinzipielle Unterschied zwischen beiden Systeme ist der, daß bei den Pufferbatterien ein Umsatz von elektrischer in chemische Energie und umgekehrt, bei den Puffermaschinen ein Umsatz von elektrischer in mechanische Energie und umgekehrt stattfindet.

113. Wirkungsweise einer Pufferbatterie.

Bei einem Nebenschlußgenerator fällt die Klemmenspannung mit zunehmendem Belastungsstrom, und es gehört bei einem bestimmten Erregerwiderstande zu einem gegebenen Belastungsstrom eine bestimmte Klemmenspannung. (Äußere Charakteristik, siehe

Digitized by Google

S. 604, Bd. I). Schalten wir parallel zu dem Generator eine Akkumulatorenbatterie und wählen wir die Anzahl der Zellen so groß, daß bei der mittleren Belastung des Netzes die Batterie gerade keinen Strom abgibt oder aufnimmt, so wird durch die Batterie ein Ausgleich der Netzbelastung in bezug auf den Generator stattfinden, d. h., wird dem Netze eine Stromstärke, die größer als die mittlere ist, entnommen, so wird die Batterie zur Stromlieferung herangezogen, während wenn das Netz mit einer Stromstärke, die kleiner als die mittlere ist, belastet wird, eine Ladung der Batterie eintritt.

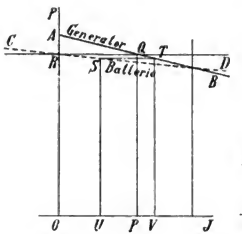


Fig. 447. Abhängigkeit der Klemmenspannung vom Strome.

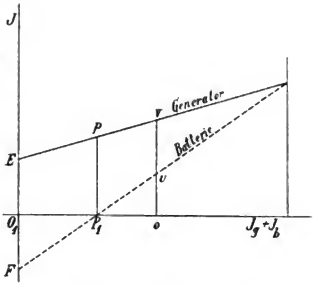


Fig. 448. Stromstärke des Generators und der Batterie in Abhängigkeit vom Belastungsstrome.

Der Vorgang läßt sich leicht an der Hand der Fig. 447 und 448 verfolgen. In Fig. 447 stellt AB die Abhängigkeit der Klemmenspannung des Generators von dem Belastungsstrome dar; diese Abhängigkeit ist hier der Einfachheit halber geradlinig angenommen. Die Gerade CD stellt die Abhängigkeit der Klemmenspannung der Batterie in Abhängigkeit von ihrer Stromstärke dar. Diese Abhängigkeit ist ebenfalls als eine Gerade angenommen. Die wirkliche Abhängigkeit ist eine kompliziertere und außerdem noch eine von dem Ladungszustande der Batterie abhängige. Um jedoch den Vorgang seinem Wesen nach zu verfolgen, können wir uns mit diesem schematischen Bilde begnügen.

Als mittlere Stromstärke des Netzes ist die Stromstärke OP (Fig. 447) angenommen. Bei dieser Stromstärke gibt die Batterie keinen Strom ab und nimmt keinen auf. Dies ist dadurch aus der Figur abzu-

Digitized by Google

lesen, daß zu dieser Stromstärke OP des Generators eine Klemmenspannung PQ gehört und daß bei dieser Spannung $PQ = OR$ die Batterie sich in ihrem Ruhepunkt befindet. Steigt der von dem Generator abgegebene Strom auf OV, so wird die Netzspannung gleich VT. Die Batterie wird jetzt zur Stromlieferung herangezogen. Sie gibt bei einer Netzspannung $VT = US$ eine Stromstärke OU ab. Bei einer Belastung des Netzes von $OV + OU$ Amp. liefert somit die Maschine OV Amp. und die Batterie OU Amp. Ermittelt man in gleicher Weise für verschiedene Netzstromstärken die zugehörigen Stromstärken des Generators und der Batterie, so erhält man Fig. 448. In dieser Figur ist die Stromstärke des Generators J_g und der Batterie J_b in Abhängigkeit von der Belastungsstromstärke $J_g + J_b$ aufgetragen. Bei der mittleren Belastung O_1P_1 (gleich OP in Fig. 447) wird kein Strom von der Batterie abgegeben oder aufgenommen und es ist $P_1p = O_1P_1$. Ist keine Netzbelastung vorhanden, so liefert der Generator nur Strom zur Ladung der Batterie ($O_1E = O_1F$).

Eine weitere Betrachtung der Figur 447 und 448 zeigt, daß die Einwirkung der Batterie um so kräftiger ist, je größer der Spannungsabfall des Generators und je kleiner der Spannungsabfall der Batterie ist. Hätte der Generator überhaupt keinen Spannungsabfall, d. h. wäre er so kompoundiert, daß die Klemmenspannung unabhängig von der Stromstärke ist, so würde die Batterie überhaupt nicht pufernd eingreifen. Sie würde stets entsprechend der konstanten Klemmenspannung eine konstante Stromstärke liefern. Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse, wenn der Generator überkompoundiert ist. In diesem Fall wird die Batterie bei der größeren Netzbelastung geladen und bei der kleineren Netzbelastung entladen, so daß sie jetzt die Belastungsschwankungen des Netzes vergrößert auf die Maschine überträgt.

114. Anwendung von Zusatzmaschinen bei Pufferbatterien.

In neuerer Zeit werden besondere Methoden angewendet, um das Zusammenarbeiten von Kompoundmaschinen mit Pufferbatterien zu ermöglichen und um das Eingreifen der Pufferbatterie bei Nebenschlußgeneratoren zu verstärken. Diese Methoden verfolgen alle den Zweck, den Spannungsabfall der Batterie in bezug auf die Netzspannung zu verkleinern und eventuell in eine Spannungserhöhung umzukehren. Wir wollen einige dieser Methoden kurz besprechen.[1])

[1]) L. Schröder, Anwendung von selbsttätigen Zusatzmaschinen für Elektrizitätswerke. ETZ 1906, S. 252.

Digitized by Google

a) Vorschalten einer Hauptschlußmaschine vor die Batterie (Fig. 449). Schalten wir eine Hauptschlußmaschine vor die Batterie und lassen wir sie von einem konstant erregten Nebenschlußmotor antreiben, so können wir die Drehungsrichtung so wählen, daß die Maschine wie ein negativer Widerstand wirkt, d. h. daß sie eine Spannungserhöhung erzeugt, welche proportional oder nahezu proportional dem Strome ist, welcher sie durchfließt. Hierdurch wird der Spannungsabfall der Batterie kompensiert.

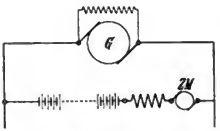


Fig. 449. Hauptschlußmaschine als Puffermaschine.

b) Puffermaschine nach Jacob (Fig. 450). Jacob versieht das Feld der vorgeschalteten Zusatzmaschine mit einer Hauptschlußwicklung und einer Wicklung, welche an den Klemmen der Batterie liegt. Die letztere erregt die Maschine derartig, daß bei Abnahme der Spannung der Batterie die Spannung der Zusatzmaschine zunimmt.

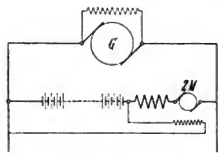


Fig. 450. Puffermaschine nach Jacob.

c) Puffermaschine von Highfield. (Fig. 451). Bei der Highfield-Schaltung liegt die Erregung der Zusatzmaschine *ZM* in Reihe mit einer zwischen den Klemmen der Batterie liegenden Hilfsmaschine *HM*. Die Maschine *HM* ist eine Nebenschlußmaschine und wird mit konstanter Tourenzahl angetrieben. Ihre Klemmenspannnung ist so eingestellt, daß sie gleich der Spannung der Batterie ist, wenn diese keinen Strom abgibt oder aufnimmt. Es fließt somit bei diesem Belastungszustand kein Strom durch die Erregung der Zusatzmaschine *ZM*. Wird jetzt die Batterie zur Stromlieferung herangezogen, so fällt die Spannung der Batterie und da die Maschine *HM* ihre Spannung beibehält, fließt jetzt ein Strom durch die Erregerwicklung der Zusatzmaschine und zwar ist dieser Strom so gerichtet, daß die induzierte EMK der Zusatzmaschine sich zu der Batteriespannung addiert. Die Highfield-Puffermaschine erhält bei neueren Ausführungen noch eine Feldwicklung, welche vom Netzstrom durchflossen wird.

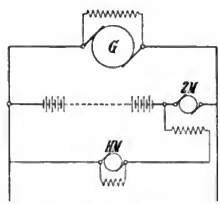


Fig. 451. Puffermaschine von Highfield.

Digitized by Google

d) Pirani-Puffermaschine (Fig. 452). Nach dieser Schaltung erhält die mit konstanter Umdrehungszahl angetriebene Zusatzmaschine zwei Erregerwicklungen, eine, welche den Netzstrom führt, und eine, welche an den Klemmen der Batterie angeschlossen ist. Die Wicklungen wirken einander derart entgegen, daß wenn H von dem mittleren Belastungsstrom durchflossen wird, die Zusatzmaschine keine Spannung gibt. Steigt die Belastung, so wird die Zusatzmaschine so magnetisiert, daß ihre Spannung sich zu der Batteriespannung addiert; fällt umgekehrt die Belastung, so wird die Zusatzmaschine so erregt, daß ihre Spannung der Batteriespannung entgegengesetzt gerichtet ist. Da bei Zunahme des Batteriestromes die Spannung an den Batterieklemmen sinkt, so unterstützt außerdem die Nebenschlußwicklung die Hauptstromwicklung.

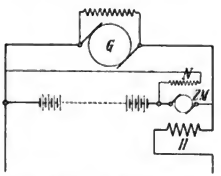


Fig. 452. Pirani-Puffermaschine.

Es ist zu bemerken, daß die Schaltungen nur schematisch angegeben sind. Bei wirklichen Ausführungen wird öfters eine besondere Erregermaschine für die Zusatzmaschine vorgesehen und die notwendige besondere Magnetwicklung auf diese Erregermaschine gelegt. Auch wird meistens bei der Schaltung von Pirani nicht der ganze Belastungsstrom zur Hauptschlußerregung verwendet, sondern es wird ein kleiner Widerstand in die Netzleitung gelegt und die Erregerwicklung an die Klemmen dieses Widerstandes angeschlossen.

115. Wirkungsweise der Pufferaggregate.

Pufferaggregate kommen hauptsächlich da in Anwendung, wo es sich um Belastungsänderungen periodischer Natur handelt, wie z. B. bei Fördermaschinen und Walzenzugmaschinen.

Wir wollen zunächst kurz darlegen, wie der Arbeitsumsatz zwischen Maschine und Schwungrad stattfindet. Wir betrachten hierzu ein Aggregat, bestehend aus einem Motor, einem Generator und einem auf der gemeinsamen Welle sitzenden Schwungrad. Der Generator ist unmittelbar an die schwankende Belastung angeschlossen, während der Motor am Hauptnetze liegt.

Bei einer Tourenzahl n hat das Schwungrad eine kinetische Energie

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{n}{60}\right)^2 G D^2 \text{ kgm} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (184)$$

Digitized by Google

wenn GD^2 das Schwungmoment in kgm² ist. Ändert sich die Tourenzahl von n_2 auf n_1 ($n_2 > n_1$), so wird das Schwungrad Arbeit abgeben, und zwar

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{3600}\right) GD^2 \text{ kgm}.$$

Setzt man die Tourenänderung $n_2 - n_1$ gleich p% der mittleren Tourenzahl n_m, so wird

$$n_2 - n_1 = \frac{p}{100}\,\frac{n_2 + n_1}{2} = \frac{p}{100}\,n_m$$

und

$$\boldsymbol{A = \frac{p}{100}\left(\frac{n_m}{60}\right)^2 GD^2 \text{ kgm}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (185)$$

Wir wollen jetzt annehmen, daß die Belastung sich in Abhängigkeit von der Zeit nach Kurve *I*, Fig. 453[1]) ändert. $X - X$ ist die Abszissenachse der Kurve. Nach der Zeit AB wiederholt sich das

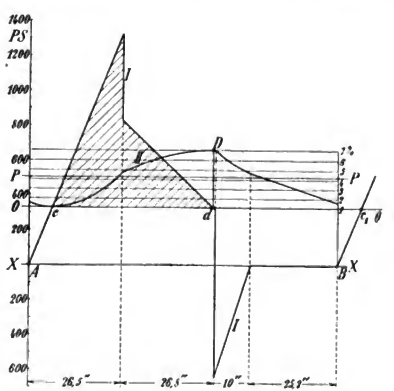


Fig. 453.

ganze Spiel, es stellt somit der Teil der Kurve *I* zwischen *A* und *B* eine Belastungsperiode dar. Den Mittelwert der Belastung erhalten wir durch Integration der Kurve *I*. Er wird durch die Gerade $O - O$ dargestellt. Wir verlangen, daß der Puffermotor eine nur

[1]) Diese Kurve entspricht dem Förderdiagramm für den von den Siemens-Schuckertwerken eingerichteten Tiefbauschacht in Karwin (Z. f. E. 1906, S. 681).

Digitized by Google

um wenige Prozente von diesem Mittelwert abweichende Leistung dem Hauptnetze entnimmt. (Wir lassen hierbei sowie in den nachfolgenden Betrachtungen die Verluste im Puffermotor und Generator außer Betracht.) Die Abweichungen der momentanen Leistung von der mittleren müssen dann fast vollständig durch das Schwungrad ausgeglichen werden. In c fängt das Schwungrad an Arbeit abzugeben und es muß imstande sein, die durch die schraffierte Fläche zwischen c und d gegebene Arbeit bei einer festgelegten Tourenänderung abzugeben. Von d bis c_1 wird das Schwungrad wieder beschleunigt. Zur Berechnung der Größe des Schwungrades müssen wir somit die durch die schraffierte Fläche zwischen c und d bestimmte Arbeit gleich AA in Formel 185 einsetzen. Aus Formel 185 ist leicht zu ersehen, daß das Schwungmoment um so kleiner und somit das Schwungrad um so leichter wird, je größer die Tourenzahl und die prozentuale Tourenänderung ist. Bei der Wahl der Tourenzahl muß man Rücksicht auf den Durchmesser des Schwungrades nehmen, um eine gewisse Umfangsgeschwindigkeit nicht zu überschreiten. Die Schwungräder werden jetzt allgemein aus Stahlguß hergestellt und als Grenze für die Umfangsgeschwindigkeit ist etwa 80—90 m/sec zu betrachten. Was die Werte für die prozentuale Tourenänderung p betrifft, so findet man diese meistens zwischen 6 und 12%, jedoch kommen auch Anlagen mit $p = 30\%$ vor.

In unserem Beispiel ist die schraffierte Fläche gleich 16500 PS. sec $= 1240000$ kgm. Der Puffermotor ist hier ein Asynchronmotor, was auf die Wirkungsweise des Aggregates keinen Einfluß hat. Nehmen wir an, daß der Motor bei der größten Tourenzahl 1% und bei der kleinsten Tourenzahl 7% schlüpft und weiter, daß die mittlere Tourenzahl gleich 480 ist, so wird nach Gl. 185

$$1240000 = 0{,}06 \cdot \left(\frac{480}{60}\right)^2 \cdot GD^2 \text{ kgm}$$

und es muß sein

$$GD^2 = 323000 \text{ kgm}^2.$$

Es läßt sich jetzt auch leicht die Tourenzahl des Pufferaggregates für jeden Moment feststellen. Wir nehmen wieder an, daß die ganze Abweichung der momentanen von der mittleren Leistung vom Schwungrad geliefert bezw. aufgenommen wird. Konstruieren wir vom Punkt c ausgehend die Integralkurve der Kurve I in bezug auf die Achse $O - O_1$ so erhalten wir die Kurve II. Diese Kurve stellt, bezogen auf die Achse $O - O_1$ für jeden Moment die Arbeit dar, welche seit dem Zeitpunkte c vom Schwungrad abgegeben worden

Digitized by Google

ist. Diese Arbeit hat ihren Maximalwert in d, von da ab nimmt die totale abgegebene Arbeit wieder ab, d. h. es wird nach d dem Schwungrad Arbeit zugeführt. Die maximale abgegebene Arbeit dD ist natürlich gleich der schraffierten Fläche zwischen c und d. Das Schwungrad gibt in der Zeit cd gerade so viel Arbeit ab, als es in der Zeit dc_1, der nächsten Periode, wieder aufnimmt, weil wir den Wirkungsgrad gleich 1 angenommen haben.

Aus Formel 185 sieht man, daß ΔA ungefähr proportional p ist. Die Kurve *II* stellt somit auch annähernd den Tourenabfall in jedem Moment dar, und zwar nur annähernd, weil für n_m immer der Mittelwert der Grenzwerte der betrachteten Änderung einzusetzen ist. Die größten Fehler, welche wir durch diese Annäherung machen, liegen bei c und d und betragen dort ca. $p\,\%$. Da es sich für uns nur um einen Überblick über die Wirkungsweise handelt, wollen wir diesen Fehler in Kauf nehmen.

Der Maßstab der Kurve des Tourenabfalles läßt sich leicht bestimmen, da bei dem nach Formel 185 gerechneten Wert für das GD^2 der maximale Tourenabfall dD gleich p sein muß (hier $6\,\%$).

Wie wir im Nachfolgenden sehen werden, muß die Tourenänderung künstlich hervorgerufen werden. Dies geschieht meistens durch einen Leistungsregler, der bei einer bestimmten vom Netz aufgenommenen Leistung eine bestimmte Tourenzahl einstellt. Ist uns die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Leistung bekannt, so können wir ohne weiteres aus der Kurve des Tourenabfalles die Schwankung der vom Netze aufgenommenen Leistung bestimmen. Nehmen wir beispielsweise an, daß der Regelungsmechanismus in den in Betracht kommenden Grenzen so funktioniert, daß der prozentuale Tourenabfall gleich der prozentualen Leistungsänderung ist, so stellt die Kurve *II*, bezogen auf die Achse $P - P$, auch die Schwankung der aufgenommenen Leistung in Prozenten der mittleren Leistung dar. Die Achse $P - P$ stellt den Mittelwert der Kurve *II* in bezug auf die Achse $O - O$ dar.

Es ist noch zu bemerken, daß die puffernde Wirkung eines Schwungrades auch ausgenützt werden kann, indem man den Generator wegläßt und den Motor mit dem Schwungrad direkt oder mittelst mechanischer Übertragung mit der veränderlichen Belastung (z. B. mit der Walzenzugmaschine) kuppelt. Diese Methode wird vielfach beim Antrieb von Walzenstraßen angewendet. Die Wirkungsweise des Schwungrades wird hierdurch nicht geändert.

Digitized by Google

116. Verfahren zur Tourenänderung des Puffermotors.

Man steht jetzt vor der Aufgabe, den Puffermotor so zu betreiben, daß durch eine Änderung seiner Leistung um einige Prozente (z. B. 10—20%) eine Tourenänderung von 6—12% hervorgerufen wird. Ohne besondere Anordnungen kann man den Asynchronmotor und den Nebenschlußmotor hier nicht verwenden, da diese ihre Tourenzahl bei Änderung der Leistung nur wenig oder gar nicht ändern. Man muß somit zu künstlichen Mitteln greifen, welche im folgenden zusammengestellt sind. Wir wollen erst den Fall betrachten, in welchem der Puffermotor von einem Gleichstromnetz gespeist wird. Wir können hier die Tourenänderung erhalten:

a) durch Vorschaltung eines konstanten Widerstandes vor den Anker. Hierdurch fällt bei zunehmender Stromstärke die Klemmenspannung des Motors, und es fällt auch bei konstanter Erregung die Tourenzahl des Motors. Sei q die zulässige prozentuale Schwankung der Leistung bezw. des Stromes des Puffermotors, so ergibt eine einfache Rechnung, daß das Verhältnis des Verlustes im Widerstand zu der zugeführten Leistung sich wie p zu $p+q$ verhält. Für $p=10\%$ und $q=10\%$ ergibt sich somit, daß die Hälfte der zugeführten Leistung in den Widerständen vergeudet wird. Diese Methode ist äußerst unwirtschaftlich.

b) Durch Vorschaltung eines mittelst Leistungsreglers veränderlichen Widerstandes vor den Anker. Diese Methode ist gut anzuwenden. Das Leistungsrelais ist ein Stromrelais, das, sobald der Strom seinen mittleren Wert überschreitet, Widerstand vor den Anker schaltet und bei Abnahme des Stromes unter seinen Mittelwert Widerstand ausschaltet. Bei der mittleren Leistung des Motors ist der halbe Widerstand vorgeschaltet. Ist eine Tourenänderung von $p\%$ notwendig, so beträgt der mittlere Verlust durch die Regulierung $\frac{1}{2}p\%$ der zugeführten Leistung.

c) Durch Anordnung einer Hauptschlußwicklung auf den Magneten des Puffermotors. Durch eine derartige Wicklung wird bei zunehmender Stromstärke das Feld verstärkt und es nimmt somit die Tourenzahl ab. Man kann auch die ganze Nebenschlußwicklung weglassen und einen reinen Hauptschlußmotor anwenden.[1]) Ist der Hauptschlußmotor ungesättigt, so ändert sich sein Feld proportional mit dem Strome und es ist somit die Tourenzahl umgekehrt proportional dem Strome. Eine Leistungsänderung von z. B. 10% ruft dann eine Tourenänderung von ebenfalls ca. 10%

[1]) G. Meyersberg, Über Ausgleich von Belastungsschwankungen in Kraftübertragungsanlagen. ETZ 1903, S. 261.

Digitized by Google

hervor. Ist der Motor gesättigt, so ist das insofern ungünstig, als die Tourenänderung bei der gleichen Leistungsänderung kleiner ist, als bei dem ungesättigten Motor. Bei dieser Methode muß ein Zentrifugalregulator vorgesehen werden, welcher bei Überschreitung einer gewissen Tourenzahl eine Nebenschlußwicklung einschaltet, damit, wenn die Maschine längere Zeit unbelastet läuft, sie nicht durchgehen kann. Die Notwendigkeit dieser Nebenschlußwicklung bedeutet eine wesentliche Erhöhung des Aufwandes an Magnetkupfer.

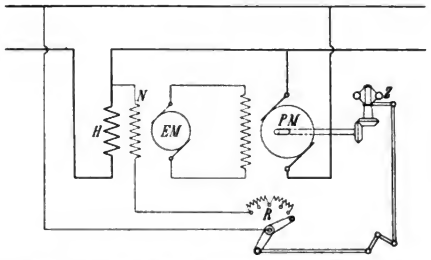


Fig. 454. Schaltung eines Puffermotors (ETZ 1903, S. 261).

PM = Puffermotor.	N = Nebenschlußwicklung.
EM = Erregermaschine.	Z = Zentrifugalpendel.
H = Hauptschlußwicklung.	R = Regulator.

Für größere Motoren empfiehlt es sich, statt den Motor als Hauptstrommotor zu bauen, eine besondere Erregermaschine für den Puffermotor anzuordnen, welche mit konstanter Tourenzahl angetrieben wird und deren Magnetwicklung vom Hauptstrom durchflossen wird. Das Schema einer derartigen Anordnung zeigt Fig. 454.

d) Durch Vorschaltung einer Hilfsmaschine mit veränderlicher Spannung vor den Anker. Diese Methode wurde von den Felten & Guilleaume-Lameyerwerken bei der Anlage in Ligny-les-Aire[1]) (s. auch S. 528) verwendet. Fig. 455 zeigt die Schaltung des Puffermotors. Es ist PM der Puffermotor und ZM die vorgeschaltete Zusatzmaschine. Die letztere Maschine kann separat mit konstanter Tourenzahl angetrieben oder direkt mit dem Pufferaggregate gekuppelt werden. Sie wird vom Netz erregt und ihre Erregung wird mittelst des Regulators R, welcher von einem Leistungsrelais beeinflußt wird, eingestellt. Bei der mittleren Leistungsaufnahme des Puffermotors ist die Erregung der Hilfsmaschine ausgeschaltet

[1]) Z. V. D. I. 1904, S. 1615.

Digitized by Google

und sie gibt keine Spannung. Steigt die Belastung des Puffermotors, so wird durch das Relais der Feldregulator so eingestellt, daß die Hilfsmaschine als Motor arbeitet. Hierdurch wird ein Teil der Netzspannung abgedrosselt und es fällt die Tourenzahl des Pufferaggregates. Geht umgekehrt die Belastung des Puffermotors zurück, so wird die Erregung der Hilfsmaschine so eingestellt, daß

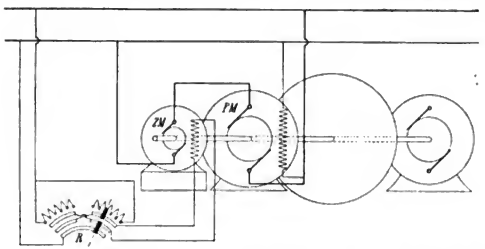


Fig. 455. Schaltung eines Puffermotors (Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke).

sie als Generator arbeitet. Die Klemmenspannung des Motors wird dann größer als die Netzspannung und das Pufferaggregat wird beschleunigt. Den Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerken ist auch eine Anordnung patentiert[1]), bei welcher der Feldregulator außer von einem Stromrelais noch von einem Zentrifugalregler beeinflußt wird. Der letzte Regulator potenziert somit die eingeleitete Tourenänderung.

e) Durch Änderung des Feldes des Puffermotors. Diese Änderung läßt sich durch Änderung der Erregung mittelst Relais erzielen. Diese Methode ist die einfachste und hat auch die meiste Verwendung erhalten.

Ist das Pufferaggregat an ein Drehstromnetz angeschlossen, so wird die Tourenzahl des Asynchronmotors geändert, indem Widerstände im Rotorkreis ein- oder ausgeschaltet werden. Die Ein- und Ausschaltung kann durch ein Leistungsrelais oder ein Zentrifugalpendel erfolgen.

Für beide Stromgattungen wäre schließlich noch eine mechanische Methode möglich, indem man den Motor mittelst einer Reibungskupplung mit Generator und Schwungrad kuppelt und die Kupplung so einstellt, daß diese gleitet, sobald die maximal zulässige Belastung des Motors überschritten wird. Die mechanische Ausführung dieses Prinzips wird jedoch bedeutenden Schwierigkeiten begegnen.

[1]) D. R. P. Nr. 159627. ETZ 1906, S. 87.

Digitized by Google

117. Konstruktive Durchbildung des Pufferaggregates.

Was die konstruktive Durchbildung des Aggregates betrifft, so wird der Puffergenerator wegen der großen und raschen Änderung der Belastung meistens mit Wendepolen oder Kompensationswicklung versehen. Das Schwungrad wird aus Stahlguß hergestellt und so bemessen, daß seine Umfangsgeschwindigkeit 80—90 m/sec nicht überschreitet. Zur Verringerung der Luftreibung kapselt man das Schwungrad ein. Versuche über den Einfluß der Kapselung auf die Luftreibung wurden von Ingenieur Köhle[1]) an einem Schwungrad von 28 t Gewicht, welches bei 450 Umdr. pro Min. eine Umfangsgeschwindigkeit von 86 m/sec hatte, vorgenommen. Es zeigte sich hierbei, daß der Gewinn durch die Kapselung 5 KW betrug. Um die Luftreibung möglichst zu beseitigen, lassen die Siemens-Schuckertwerke die Schwungräder oft im Vakuum laufen, indem die Kapselung gegen die Welle abgedichtet und mittelst Luftpumpe evakuiert wird.

Fig. 456 gibt das Bild eines Pufferaggregates der Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi. Der Puffermotor ist ein Asynchronmotor für 250/350 PS, 333/300 Touren und 3000 Volt. Die Gleichstrommaschine liefert bis 2000 Amp. mit einer Spannung von 0 bis 220 Volt. Das Schwungrad wiegt 24 t und hat ein GD^2 von ca. 200000 kgm^2. Die totale Schlüpfung beträgt 10%; nimmt man an, daß der Motor bei der unteren Leistungsgrenze mit ganz ausgeschaltetem Schlüpfungswiderstand 2% schlüpft, so bleibt zwischen der unteren und oberen Leistungsgrenze noch eine Tourenänderung von 8%. Die mittlere Tourenzahl beträgt $333\left(1-0{,}02-\frac{0{,}08}{2}\right)^2 = 320$ Touren.

Die Arbeit, welche das Schwungrad bei Änderung der Tourenzahl um 8% abgeben bezw. aufnehmen kann, ergibt sich nach Formel 185, S. 509 zu:

$$A = \frac{p}{100}\left(\frac{n_m}{60}\right)^2 GD^2 \text{ kgm}$$

$$= 0{,}08\left(\frac{320}{60}\right)^2 \cdot 200000 = 455000 \text{ kgm}.$$

Die Lager des Aggregates sind für Ringschmierung und Preßölschmierung eingerichtet. Zur Vermeidung von Gußspannungen ist die Schwungradscheibe gewölbt ausgebildet. Bemerkenswert ist

[1]) Z. f. E. 1906. S. 701.

Digitized by Google

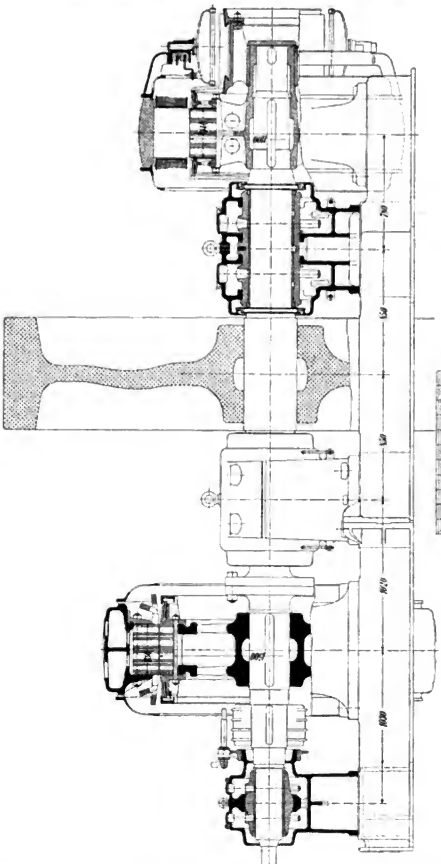


Fig. 456. Pufferaggregat der Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi.

schließlich noch die fliegende Anordnung der Gleichstrommaschine. Das Ganze zeigt einen schönen, gut durchgebildeten Aufbau.

Digitized by Google

Achtundzwanzigstes Kapitel.

Verfahren zum Anlassen und zur Tourenregulierung von Motoren mit Nebenschluß- oder Fremderregung.

118. Das Anlassen. — 119. Anlaßschaltungen. — 120. Anlassen mittelst Anlaßaggregat. — 121. Verfahren zur Tourenregulierung. — 122. Tourenregulierung durch Änderung der zu induzierenden EMK. — 123. Tourenregulierung durch Änderung des Kraftflusses. — 124. Tourenregulierung durch Änderung der Windungszahl. — 125. Tourenregulierung durch Änderung der Polzahl. — 126. Tandem-Anlaß- und Regulierverfahren.

118. Das Anlassen.

Die Aufgabe des Anlassens besteht darin, den Motor auf seine Tourenzahl zu bringen, ohne daß er einen zu großen Strom aufnimmt. Bei dem normalen Belastungsstrome beträgt der Spannungsabfall im Motor ca. 2 bis 5% der Betriebsspannung. Würde der Motor bei Stillstand direkt an das Netz angeschlossen werden, so würde er somit das 50 bis 20fache des normalen Stromes aufnehmen und dabei beschädigt werden. Um dieser großen Stromaufnahme vorzubeugen, muß im Anfang des Anlassens die Klemmenspannung klein gemacht und während des Anlassens allmählich erhöht werden. Ferner ist der Motor beim Anlassen immer voll zu erregen, damit bei einem bestimmten Ankerstrom eine möglichst große Zugkraft erhalten wird.

Wir wollen im Nachfolgenden untersuchen, in welcher Weise beim Anlassen eine kleine Spannung (P_m) an den Klemmen des Motors zu erhalten ist. Wir können unterscheiden: erstens Anlaßschaltungen, zweitens Anlassen mittelst Anlaßaggregat.

Digitized by Google

119. Anlaßschaltungen.

1. Einschaltung von Widerständen vor den Anker. Diese Methode wurde eingehend in Kapitel 18 und 19 erörtert. Wie dort nachgewiesen ist, wird hierbei während des Anlassens etwa die Hälfte der zugeführten Arbeit im Widerstand verbraucht.

2. Serie- und Parallelschaltung von zwei Motoren. Erfolgt der Antrieb einer Welle oder z. B. eines Bahnwagens durch zwei Motoren, so kann man die Anlaßverluste dadurch verkleinern, daß man die Motoren beim Anfang des Anlassens in Reihe und in der zweiten Anlaßperiode parallel schaltet. Bei der Reihenschaltung addieren sich die EMKe und die Widerstände der beiden Motoren, so daß die Motoren arbeiten, als ob jeder für sich nur an die halbe Spannung angeschlossen wäre. Diese Methode wird bei Nebenschlußmotoren nur selten angewandt. Bei den Hauptstrom-Bahnmotoren hat sie eine allgemeine Verbreitung gefunden.

3. Anschließen des Motors an verschiedene Spannungen einer Akkumulatorenbatterie. Bei dieser Methode werden an einer Batterie verschiedene Anschlüsse gemacht und der Motor wird beim Anlassen an eine stets höhere Spannung der Batterie angeschlossen. Die Anlaßverluste werden durch dieses Verfahren bedeutend verringert, jedoch sind teuere und große Schaltapparate erforderlich. Heute ist diese Methode nicht mehr gebräuchlich.

120. Anlassen mittelst Anlaßaggregat.

In den letzten Jahren ist von verschiedenen Firmen eifrig an der Aufgabe gearbeitet worden, die Schwierigkeiten, welche der Einführung des Elektromotors bei den Förderanlagen und Walzwerken im Wege standen, zu beseitigen. Diese Betriebe kennzeichnen sich dadurch, daß innerhalb kurzer Zeit aufeinanderfolgendes Anlassen und Stillsetzen oder Reversieren stattfindet und daß die Schwankung der Belastung eine große ist. Die Aufgabe, diese Belastungsschwankungen auszugleichen, wurde, wie wir im Kapitel 27 erörtert haben, durch die Anwendung von Pufferbatterien und Pufferaggregaten gelöst. Das Anlassen ohne zu große Verluste und komplizierte Apparate wird hauptsächlich durch Anordnung von besonderen Anlaßaggregaten erreicht.

Weiter haben diese Anlaßaggregate noch Anwendung gefunden bei dem Antrieb mit Motoren, deren Tourenzahl in sehr weiten Grenzen, z. B. 1 : 12, reguliert werden muß. Derartige Motoren kommen hauptsächlich für Papiermaschinen in Frage.

Digitized by Google

Im Nachfolgenden sind die wichtigsten Schaltungen der Anlaßaggregate zusammengestellt.

1. Anlassen mittelst besonderen Generators. Bei dieser Methode, allgemein als Ward-Leonard-Schaltung bekannt, kommt ein Motorgenerator zur Verwendung, dessen Motor an dem Netz hängt, während der Generator an die Klemmen des Lastmotors (Fördermotor, Walzenzugmotor, Papiermaschinenmotor) angeschlossen wird. Der Lastmotor wird konstant erregt, während die Erregung des Generators von Null bis zu einem positiven und negativen Maximum geändert werden kann. Hierdurch kann man an den Klemmen des Lastmotors jede Spannung herstellen, wodurch das Anlassen sowie die Tourenregulierung nahezu ohne besonderen Verlust erzielt werden kann.

Eine Kombination der Ward-Leonard-Schaltung mit einer Pufferbatterie zeigt die von den Siemens-Schuckertwerken ausgeführte Förderanlage auf dem Ottiliaeschacht der kgl. Berginspektion Klausthal[1]).

Die Verhältnisse sind hier folgende:

Schachtteufe	570 m
Zahl der Wagen pro Hub	2
Nutzlast pro Wagen	750 kg
Fördergeschwindigkeit für Materialförderung	10 m/sec
Gewicht der Förderschale	2760 kg
„ eines Förderwagens	500 „
„ des Seiles	4,5 kg/m

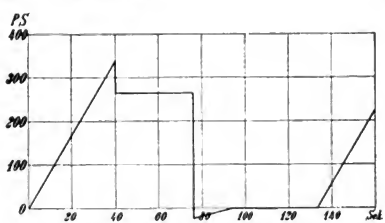


Fig. 457. Leistungsdiagramm des Fördermotors.

Fig. 457 zeigt das Leistungsdiagramm des Fördermotors. Zur Verfügung steht Gleichstrom mit einer Spannung von 500 Volt. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist es nicht angängig, den

[1]) Elektr. Bahnen 1907, S. 301.

Digitized by Google

Motor direkt an das Netz anzuschließen, da in diesem Falle im Netz Belastungsstöße bis zu 340 PS auftreten würden. Wie schon erwähnt, wird bei dieser Anlage eine Pufferbatterie angewandt, und zwar in Kombination mit einer Pirani-Zusatzmaschine (s. S. 508). Fig. 458 zeigt das Schaltungsschema der Anlage. Beim Betrieb sind die beiden Schalter *U* nach unten gelegt. Die Anlaßdynamo ist dann nur unter Zwischenschaltung eines Strommessers *Str* mit dem Fördermotor verbunden. Die Erregung des Fördermotors liegt direkt am Netz. Der in diesen Kreis eingeschaltete Feldschwächer *F* wird bei normalem Betrieb nicht ge-

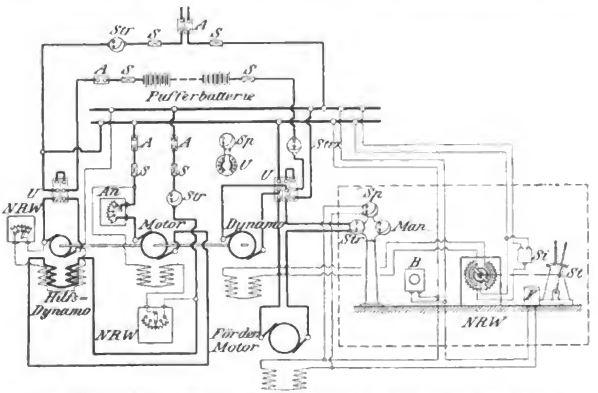


Fig. 458. Schaltungsschema der Förderanlage auf dem Ottiliaeschacht.

braucht. Der Erregerstrom der Anlaßdynamo wird ebenfalls dem Netz entnommen; er kann durch Einstellung des Regulators *NRW* (rechts in der Figur) beliebig reguliert und umgekehrt werden. Der Motor des Anlaßaggregates hängt am Netz und in seinen Hauptkreis ist die Hauptschlußwicklung der Pirani-Zusatzmaschine eingeschaltet. Die Wirkungsweise der Pirani-Zusatzmaschine ist eingehend im Abschn. 114 erörtert. Werden die Schalter *U* nach oben gelegt, so wird die Pirani-Maschine und der Fördermotor abgeschaltet und die Anlaßdynamo auf die Klemmen der Batterie gelegt. Durch passende Erregung der Anlaßdynamo kann in dieser Schaltung die Batterie aufgeladen werden.

Als Beispiel einer Kombination der Ward-Leonard-Schaltung mit einem Schwungradausgleich diene die von den Siemens-Schuckert-

Digitized by Google

werken ausgeführte Förderanlage Zollern II der Gelsenkirchener Bergwerks-A.-G. Merklinde[1]. Diese Kombination, zuerst vorgeschlagen von Oberingenieur Karl Ilgner, hat eine sehr große Verbreitung gefunden. Die Verhältnisse des Schachtes sind: Teufe vorläufig 280, später 500 m, Nutzlast 4200 kg. Die größte Fördergeschwindigkeit beträgt vorläufig 10 m/sec, kann jedoch später auch auf 20 m/sec gebracht werden. Die Welle der Fördertrommel ist direkt mit zwei Elektromotoren gekuppelt, welche für eine Seilgeschwindigkeit von 10 m/sec hintereinander und für eine Seilgeschwindigkeit von 20 m/sec parallel geschaltet werden können. Die Motoren machen

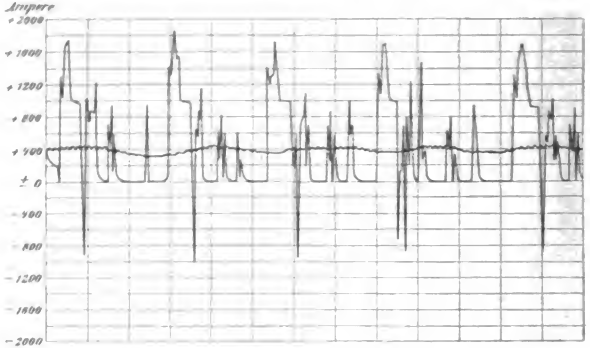


Fig. 459. Stromaufnahme des Puffermotors und der Fördermotoren.

bei 10 m/sec Seilgeschwindigkeit 32 Umdrehungen in der Minute. Die Fördermaschine ist mit den Primärmaschinen in demselben Saal untergebracht. Die Primärmaschinen liefern Gleichstrom mit einer Spannung von 500 Volt. Der Strom zur Speisung der Fördermotoren kann sowohl einer Batterie als einem Anlaßaggregate entnommen werden. Das Anlaßaggregat nimmt ca. 300 PS auf und läuft mit einer Tourenzahl von 350 Umdrehungen in der Minute. Es ist direkt mit einem Schwungrad von 40 t gekuppelt. Die Tourenänderung des Puffermotors (s. Abschn. 115) beträgt 10% und wird durch Änderung der Erregung des Puffermotors erzielt (s. S. 514). Die Spannung der Anlaßdynamo kann zwischen — 500 und + 500 Volt reguliert werden. Fig. 459 zeigt, wie ausgezeichnet der

[1]) Nachrichten der Siemens-Schuckertwerke, Heft 5, April 1905.

Digitized by Google

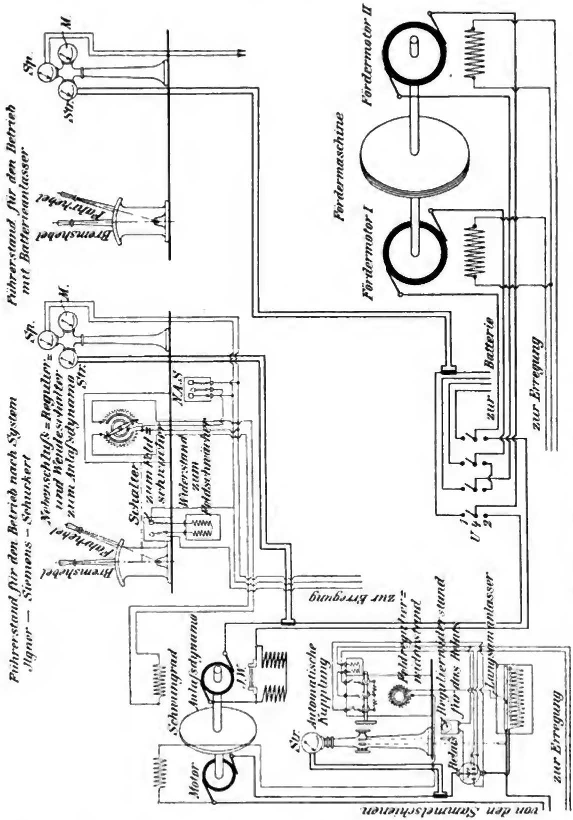


Fig. 460. Schaltungsschema der Förderanlage Zollern II.

Ausgleich durch das Schwungrad wirkt. Es sind in dieser Figur die Stromaufnahme der Fördermotoren und des Puffermotors aufgetragen. Während die Stromaufnahme der Fördermotoren zwischen — 1000 bis + 2000 Amp. schwankt, ändert sich der dem Puffermotor zugeführte Strom nur von etwa 300 bis 450 Amp.

Digitized by Google

Fig. 460 zeigt das Schaltungsschema dieser Anlage.

Bei der Verwendung von Elektromotoren für den Antrieb von Walzenzugmaschinen liegen noch viel schwierigere Verhältnisse vor als bei dem Antrieb der Fördermaschinen. Die maximal erforderliche Leistung beträgt hier je nach der Art der Strecke 8000 — 10000 PS und es sind bis acht Umsteuerungen in der Minute erforderlich. Die Aufgabe einer schnellen Umsteuerung und eines guten Ausgleiches wurde ebenfalls durch Anwendung der Ilgner-Schaltung gelöst. Diese Lösung ist eine so vollkommene, daß bei der Beschreibung einer ausgeführten Hüttenanlage[1]) erwähnt wird, daß das Reversierwalzwerk der angenehmste Stromabnehmer für das elektrische Netz ist und daß die Schwankung der Stromentnahme im Vergleich zu Schwankungen, die durch andere Betriebe im Netz hervorgerufen werden, ganz zu vernachlässigen ist.

Um einen Einblick in die Verhältnisse einer elektrisch betriebenen Reversierwalzenstraße zu erhalten, diene folgende kurze Beschreibung der von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin ausgeführten Anlage auf der Hildegardehütte[2]).

Für den Betrieb der Anlage waren folgende Bedingungen zu erfüllen: Regulierbarkeit der Tourenzahl der Walzenzugmotoren zwischen Stillstand und 110 bis 120 Touren i. d. Min., sechsmaliges Anlassen und Stillsetzen während einer Minute bei wechselnder Drehrichtung, Beschleunigung auf volle Umlaufszahl in 3 bis 4 Sekunden, Abgabe eines mittleren Drehmomentes entsprechend einer Leistung von 3600 PS und eines maximalen Drehmomentes entsprechend einer Leistung von 10000 PS bei 110 Touren.

Um das rasche Anlassen mit möglichst geringem Drehmoment zu erreichen, war es notwendig, das Trägheitsmoment der Anker der Walzenzugmotoren möglichst klein zu machen. Dies wurde erreicht durch Verteilung der Leistung auf drei gleiche Einheiten. Das GD^2 der drei Motoren beträgt 180000 kgm^2, dieses erfordert bei gleichmäßiger Beschleunigung auf 110 Touren innerhalb 4 Sekunden ein Drehmoment entsprechend einer Leistung von 2000 PS bei 110 Touren.

Das Umformeraggregat besteht aus einem Drehstrom-Asynchronmotor für 3000 Volt 50 Perioden von 2500 PS und 375 Umdr/Min., zwei Gleichstrom-Anlaßdynamos und zwei Stahlgußschwungrädern von je 26 t Gewicht und 80 m/sec Umfangsgeschwindigkeit. Jede Anlaßdynamo ist für 500 Volt und eine maximale Stromstärke von

[1]) Elektr. Bahnen 1907, S. 321.

[2]) Ausführliche Beschreibung der Anlage siehe: H. Alexander, ETZ 1907, S. 727 und Geyer, Elektr. Bahnen u. Betriebe 1907, S. 321.

Digitized by Google

8000 Amp. gebaut, so daß von jeder Maschine 4000 KW entnommen werden können.

Zur Verhinderung unzulässiger Beanspruchungen des Antriebes und der Konstruktionsteile der Walzenstraße dient ein Maximalausschalter, der so eingestellt ist, daß er etwa bei 9000 KW ausschaltet.

Wegen der Unsicherheit gleichmäßiger Stromverteilung, welche bei Parallelschaltung direkt gekuppelter Maschinen auftritt, wurden sowohl die Anker der zwei Anlaßdynamos, wie die Anker der drei Motoren in Serie geschaltet, so daß die Maximalspannung im Gleichstromkreis 1000 Volt beträgt.

Die Tourenzahl des Umformer-Aggregates schwankt bei normalem Betriebe zwischen 375 und 320 und sinkt bei härteren Blöcken bis auf 300 herab. Die Regulierung der Tourenzahl und die Reversierung der Walzenzugmotoren erfolgt durch Regulierung der Spannung und Umkehrung der Polarität der Anlaßdynamos mit Hilfe eines Steuerschalters, welcher den im Feldstromkreis der Dynamos liegenden Nebenschlußregulator und Umschalter betätigt. Ein Erregerumformer gibt Gleichstrom von 230 Volt für die Erregung der Dynamos und der Motoren.

Sowohl die Anlaßdynamos als die Walzenzugmotoren sind mit verteilter Kompensationswicklung nach Déri und Wendepolen versehen. H. Alexander[1]) motiviert die Wahl von kompensierten Maschinen gegenüber Wendepolmaschinen (ohne Kompensation des Ankerquerfeldes) damit, daß die Wendepolmaschine wegen der nicht aufgehobenen Quermagnetisierung einen wesentlich größeren Luftspalt erhalten muß, da anderenfalls zu starke zusätzliche Eisenverluste in den Ankerzähnen und eine schädliche Erhöhung der Spannung zwischen benachbarten Kommutatorsegmenten infolge der Feldverzerrung auftreten. Der größere Luftspalt der Wendepolmaschine bedingt eine stärkere Feldwicklung, und daher langsamere Erregung infolge der größeren Zeitkonstante der Wicklung, ihre größere radiale Ausdehnung der Hauptpole und Wendepole hat ferner größere Streuung zur Folge, wodurch eine Beschränkung der Überlastungsfähigkeit der Maschine eintritt. (Vgl. Bd. I, Abschn. 142, S. 571.)

Um bei kurzen Überlastungen den Strom innerhalb des Ausschaltungsbereiches des Maximalausschalters zu halten, sind die Anlaßgeneratoren mit einer gegenkompoundierenden, die Walzenzugmotoren mit einer aufkompoundierenden Feldwicklung versehen. Hierdurch wird eine Dämpfung des Stromes durch das Anwachsen

[1]) ETZ 1907, S. 780.

Digitized by Google

des Stromes selbst bewirkt und das Drehmoment der Walzenzugmotoren für eine bestimmte Stromstärke erhöht und zu gleicher Zeit bei zunehmender Belastung die Tourenzahl herabgesetzt. Die Herab-

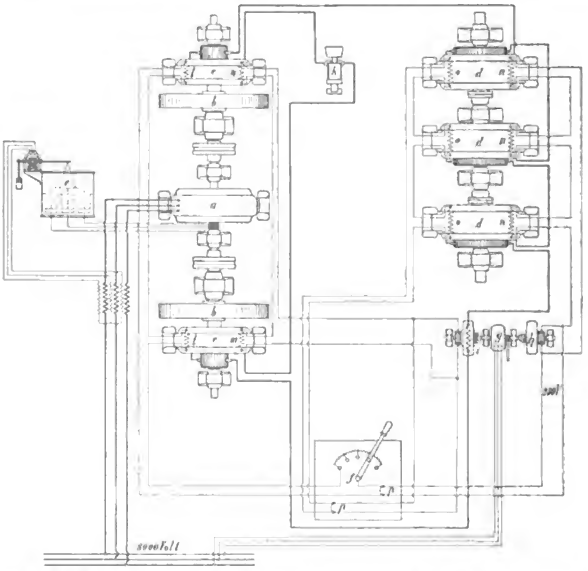


Fig. 461. Schaltungsschema des Reversierstraßen-Antriebes der Hildegardehütte.

a = Drehstrommotor des Schwungrad-Umformers.
b = Schwungräder.
c = Anlaßgenerator.
d = Walzenzugmotoren.
e = Schlupfregler.
f = Anlaßregulator.
g = Drehstrommotor der Erreger-Umformer.
h = Erregerdynamo.
i = Hilfsdynamo.
k = Automatischer Maximalausschalter.
l = Hauptfeld der Anlaßgeneratoren.
m = Hilfsfeld der Anlaßgeneratoren.
n = Hauptfeld der Walzenzugmotoren.
o = Hilfsfeld der Walzenzugmotoren.
p = Umschalter.

setzung der Tourenzahl hat die Folge, daß für ein gegebenes Drehmoment eine kleinere zugeführte Leistung erforderlich ist und daß außerdem die für die Beschleunigung erforderliche Leistung ver-

Digitized by Google

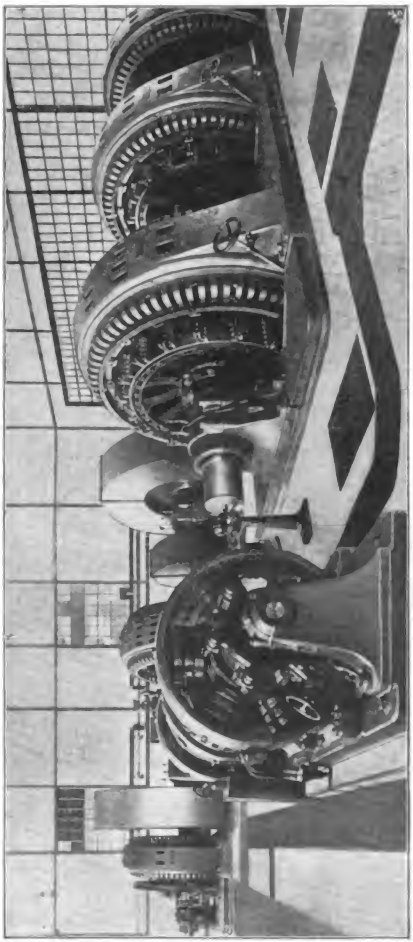


Fig. 462. Übersicht des elektrischen Reversierstraßen-Antriebes der Hildegardehütte.

Digitized by Google

ringert wird. Da bei der Umkehrung der Erregung der Generatoren sich Spannung und Strom zu gleicher Zeit umkehren, werden die gegenkompoundierenden Windungen für jede Richtung des Stromes richtig geschaltet sein. Bei den Walzenzugmotoren behält beim Reversieren die Fremderregung ihren Sinn bei, während der Strom des Motors sich umkehrt. Es ist somit bei den Motoren nur möglich, eine richtige Wirkung der Hauptschlußwindungen für jede Drehrichtung zu erzielen, indem man den Strom in der Hauptschlußwicklung bei Änderung der Drehrichtung umkehrt. Würde man diese Umkehrung im Hauptkreis vornehmen, so würde einer der Hauptvorzüge der Anlaßschaltung, Vermeidung des Schaltens im Hauptstromkreis, verloren werden. In der vorliegenden Anlage wurde deshalb eine besondere Erregermaschine zur Speisung der Hauptschlußwicklungen angeordnet. Diese Maschine wird vom Hauptstrom der Walzenzugmotoren erregt und ist schwach gesättigt, so daß ihre Klemmenspannung annähernd dem Hauptstrom proportional ist. Der Strom in der Hauptschlußwicklung ist jetzt gering und kann ohne Schwierigkeit umgeschaltet gehen. Der Umschalter der Hauptschlußwicklung für den Erregerstrom der Walzenzugmotoren ist derart mit dem Anlaßregulator gekuppelt, daß bei Umkehrung des Erregerstromes des Anlaßgenerators gleichzeitig die Stromrichtung in der genannten Hauptschlußwicklung umgekehrt wird. Diese besondere Erregermaschine wird mit der gewöhnlichen Erregermaschine von einem Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben. (Aggregat *g*, *h*, *i* Fig. 461.)

Versuche zeigten, daß es ohne die zulässige Stromstärke der Reversiermotoren zu übersteigen möglich war, die Motoren in 2 bis $2^1/_2$ Sek. auf die volle Tourenzahl von 110 Umdrehungen pro Minute zu bringen. Beim Auswalzen von Knüppeln ergab sich, daß bei Schwankungen an den Walzmotoren von 0 – 4000 PS die dem Drehstrommotor zugeführte Leistung nur um 50 KW oberhalb und unterhalb der normalen Leistung schwankte.

Fig. 461 zeigt das Schaltungsschema und Fig. 462 eine Photographie dieser Anlage. In Fig. 462 ist im Hintergrund der Ilgner-Umformer sichtbar. Im Vordergrunde steht der Umformer für die Erregung, rechts stehen die drei direkt gekuppelten Reversiermotoren. Die Schaltanlage befindet sich links, sie ist in der Figur weggelassen.

2. Anlassen mittelst Vorschaltung einer Anlaßmaschine. Diese Methode ist in Fig. 463 dargestellt. Vor den Anker des Lastmotors *L M* ist der Anker einer Anlaßmaschine *A M* geschaltet, welche von einer Nebenschlußmaschine *M* auf konstanter Tourenzahl gehalten wird. Befindet sich das Aggregat im Betrieb und will man den Lastmotor anlassen, so erregt man die Anlaßmaschine *A M* bei offenem Schalter *S*

Digitized by Google

so, daß ihre Spannung gleich der Netzspannung ist. Dann schließt man den Schalter S und schaltet die Erregung des Motors LM auf das Netz. Da die Klemmenspannung der Zusatzmaschine gleich der Netzspannung gemacht wurde, ist die Klemmenspannung des Motors gleich Null. Es wird jetzt die Erregung der Zusatzmaschine allmählich geschwächt, wodurch die Spannung an den Klemmen des Motors LM steigt und der Anlauf beginnt. Die Zusatzmaschine läuft dann als Motor, indem sie die Netzspannung abdrosselt. Die Leistung, welche sie aufnimmt, ist gleich abgedrosselte Spannung mal Anlaßstromstärke und wird dem Netz durch die direkt gekuppelte Maschine M zurückgeliefert. Bei der konstanten Erregung der Maschine M kann das Aggregat seine Tourenzahl nur innerhalb enger Grenzen ändern. Ist der Anlauf beendet, d. h. ist die Spannung der Zusatzmaschine gleich Null, so kann der Motor direkt an das Netz angeschlossen und das Aggregat abgestellt werden. Bei dieser Anordnung ist die Anlaßmaschine für die volle Spannung und Stromstärke des Lastmotors zu bemessen.

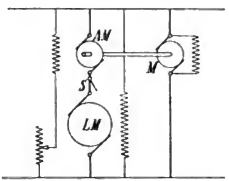


Fig. 463. Anlaßschaltung mit vorgeschalteter Anlaßmaschine.

Die Anlaßmaschine kann halb so groß werden, wenn man mit der Erregung dieser Maschine nicht nur bis Null geht, sondern auch die Richtung des Erregerstromes umkehrt, so daß die Spannung der Anlaßmaschine sich zu der Netzspannung addieren kann.

Diese Schaltung wurde u. a. von den Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerken bei der Förderanlage für die Compagnie des Mines de Ligny-les-Aire[1]) angewandt. Die Verhältnisse dieser Anlage sind: Schachtteufe 400 m, Nutzlast 2200 kg, Fördergeschwindigkeit 6 m/sec. Der Antrieb der Treibscheibe geschieht durch zwei direkt gekuppelte, fliegend angeordnete Elektromotoren. Ihr Kraftbedarf beträgt beim Anlaufen zusammen ungefähr 510 PS und während des Betriebes etwa 300 PS. Das Anlassen geschieht in der oben erwähnten Weise mittelst einer umkehrbaren Zusatzmaschine. Diese Maschine ist direkt mit einer Puffermaschine gekuppelt und das ganze Aggregat erhält ein Schwungrad von 6,5 t mit einem $GD^2 = 33300$ kgm^2. Um den Tourenabfall der Puffermaschine hervorzurufen, wurde nach der auf S. 513 beschriebenen Methode eine umkehrbare Zusatzmaschine vor den Anker der Puffer-

[1]) Z. V. D. I. 1904, S. 1615.

Digitized by Google

maschine geschaltet. Diese Zusatzmaschine ist direkt mit dem Aggregate gekuppelt. Der Puffermotor ist für maximal 400 Amp. bei 450 bis 640 Volt, die Anlaßmaschine für 400 Amp. bei 0 bis 640 Volt und die Zusatzmaschine für 400 Amp. bei 0 bis 113 Volt gebaut. Das Aggregat läuft mit maximal 500 Umdr. pro Min. Um die puffernde Wirkung des Schwungrades auszunützen, ist ein Tourenabfall von 30% vorgesehen.

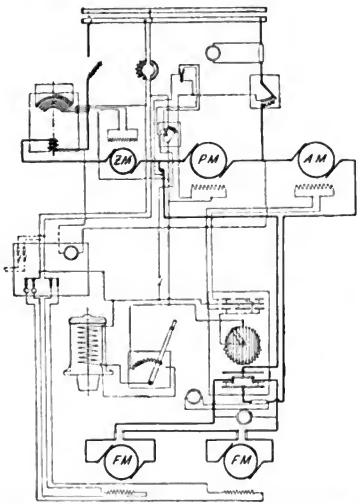


Fig. 464. Schaltungsschema der Förderanlage der Comp. des Mines de Ligny-les-Aire.

Fig. 464 zeigt das vollständige Schaltungsschema. Es ist *ZM* die Zusatzmaschine, *PM* der Puffermotor und *AM* die Anlaßmaschine. Bei dieser Anlaßmethode muß bei Änderung der Fahrrichtung die Schaltung der Motoren selbst geändert werden. Dies geschieht hier durch Umschaltung der Leitungen im Ankerstromkreis. Diese Umschaltung bietet jedoch keine Schwierigkeiten, da im Moment des Umschaltens die Spannung an den Klemmen Null ist. Der Umschalter ist in Fig. 464 ersichtlich. Außerdem ist die Anlage mit verschiedenen Sicherheitsvorrichtungen ausgerüstet, durch welche die ganze Anlage stromlos wird, sobald die Motoren zu stark überlastet werden oder wenn die Erregung der Anlaßmaschine oder der Fördermotoren unterbrochen wird.

Nach einem Patent von Brown, Boveri & Cie. kann man die anfängliche Verringerung der Erregung der Zusatzmaschine und die Steigerung derselben nach Umkehr der Stromrichtung auch selbsttätig erfolgen lassen. Fig. 465 zeigt die Schaltung. Die Anlaßmaschine *AM* ist mit zwei Erregerwicklungen *A* und *B* versehen. *A* liegt am Netz, während *B* an den Klemmen des Lastmotors liegt. Beim Stillstand des Lastmotors *LM* herrscht an seinen Klemmen

Digitized by Google

keine Spannung und es fließt in der Magnetwicklung B kein Strom. Infolge der Erregung durch die Wicklung A wird an den Klemmen der Zusatzmaschine eine EMK erzeugt, welche der Netzspannung entgegengesetzt und um soviel kleiner als dieselbe ist, daß der erforderliche Anlaufstrom durch den Motor LM fließt. Setzt der Motor sich in Bewegung, so steigt die Spannung an seinen Klemmen und die Wicklung B erregt sich. Da die Amperewindungen der Wicklung B denjenigen der Wicklung A entgegen gerichtet sind, wird die Spannung der Zusatzmaschine abnehmen und die Klemmenspannung des Motors zunehmen. Die Wicklung B ist so bemessen, daß am Schluß der Anlaufperiode die Zusatzmaschine eine Spannung gleich der Netzspannung gibt und zwar von gleicher Richtung, so daß beim Lauf die Motorspannung gleich der doppelten Netzspannung ist.

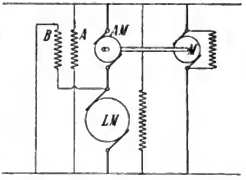


Fig. 465. Anlaßschaltung nach Brown, Boveri & Cie.

3. Anlaßaggregat für Dreileiternetze. Eine Schaltung eines Anlaßaggregates für Dreileiternetze, bei welcher von den beiden besprochenen Anlaßmethoden Gebrauch gemacht wird, wurde

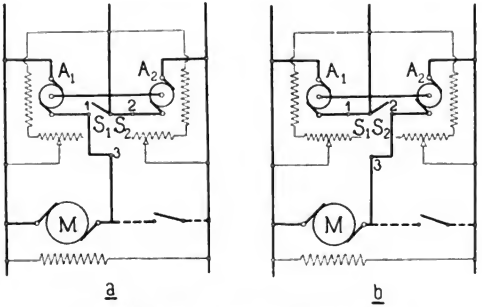


Fig. 466. Anlaßschaltung für Dreileiternetz.

Siemens & Halske in Wien patentiert[1]) (Fig. 466). In der ersten Anlaßperiode (Fig. 466a) treibt die Maschine A_2 den Generator A_1

[1]) Z. f. E. 1904, S. 511.

Digitized by Google

an. Dieser Generator ist direkt auf die Klemmen des Lastmotors M geschaltet (Ward-Leonard-Schaltung). Die Spannung des Generators A_1 wird allmählich von 0 auf die halbe Netzspannung gebracht und der Motor läuft an. Liegt der Motor an der halben Netzspannung, so kann, ohne eine Änderung in den Zustand zu bringen, der Schalter S_1 geschlossen werden. In der zweiten Anlaßperiode (Fig. 466b) wird die Verbindung 2—3 hergestellt und der Schalter S_2 geöffnet. Die Maschine A_2 wird jetzt als vorgeschaltete Zusatzmaschine benutzt. Ihre Erregung wird allmählich verringert, während die Erregung der Maschine A_1 konstant gehalten wird. Auch in dieser Anlaßperiode läuft die Maschine A_2 als Motor, indem sie die abgedrosselte Leistung mittelst des Generators A_1 wieder ins Netz liefert. Der Motor M erreicht seine volle Tourenzahl, wenn die Spannung der Maschine A_2 gleich Null ist. Er kann dann an das Netz angeschlossen werden.

121. Verfahren zur Tourenregulierung.

Die Gleichung für die Tourenzahl

$$n = 60 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{N} \frac{a}{p} \frac{E_a}{\Phi}$$

gibt uns die verschiedenen Wege an, auf welchen man auf die Tourenzahl einwirken kann; es ergeben sich entsprechend den vier Faktoren der Gleichung vier verschiedene Reguliermethoden:

1. Änderung der zu induzierenden EMK E_a.
2. Änderung des Kraftflusses Φ.
3. Änderung der Windungszahl N.
4. Änderung der Polzahl p.

122. Tourenregulierung durch Änderung der zu induzierenden EMK.

1. Schaltung von Widerständen vor den Anker. Nach Seite 416 erhalten wir in diesem Fall die Gleichung

$$J_a = \frac{P - E_a}{R + R_g} \quad \text{oder} \quad E_a = P - J_a(R + R_g).$$

Es ist $J_a R$ der Spannungsabfall im vorgeschalteten Widerstand und $J_a R_g$ der Abfall in der Ankerwicklung und unter den Bürsten.

Da bei dieser Regulierung der Kraftfluß Φ konstant gehalten

Digitized by Google

wird, folgt aus Gl. 182, S. 484, daß das Drehmoment dem Ankerstrom proportional ist, somit

$$J_a = c\,\vartheta.$$

Führt man diese Beziehung in die Gleichung für E_a ein, so findet man

$$E_a = P - c\,\vartheta\,(R + R_g) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (186)$$

Die Einwirkung eines bestimmten Wertes des Vorschaltwiderstandes R auf die zu induzierende EMK und damit auch auf die Tourenzahl ist also von dem zu leistenden Drehmoment abhängig; bei großem Drehmoment wird die Tourenzahl durch den gleichen Widerstand mehr verringert als bei kleinem, und bei Leerlauf hat der Vorschaltwiderstand sehr wenig Einfluß. Die genaue Einstellung einer bestimmten Tourenzahl ist also bei dieser Reguliermethode nicht möglich. Außerdem ist dieselbe sehr unökonomisch, da bei ihr von der gesamten, dem Motor zugeführten Energie PJ ein der Verminderung der Tourenzahl prozentual gleicher Teil in den Vorschaltwiderständen vernichtet wird, der Wirkungsgrad also im Verhältnis der Tourenänderung sinkt.

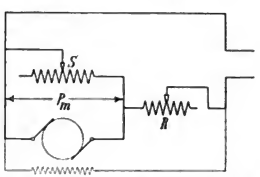


Fig. 467. Schaltung zur Tourenregulierung der Cutler-Hammer Mfg. Co.

Um den Einfluß der Größe des Drehmomentes auf die Tourenzahl zu vermindern, schaltet die Cutler-Hammer Manufacturing Co. nach der Schaltung Fig. 467 außer dem Vorschaltwiderstand R noch einen Regulierwiderstand S parallel zum Motor. Durch eine einfache Rechnung ergibt sich dann die induzierte EMK

$$E_a = \frac{P}{1 + \frac{R}{S}} - c\,\vartheta\left(\frac{R}{1 + \frac{R}{S}} + R_g\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (187)$$

Für $S = \infty$ geht diese Gleichung in Gl. 186 über. Wir sehen weiter, daß der Einfluß von ϑ auf die Tourenzahl um so kleiner ist, je kleiner S ist. Natürlich nehmen die Verluste in den Widerständen mit Abnahme von S stark zu. Die Regulierung ist außerordentlich unökonomisch und kann nur da, wo die Geschwindigkeitsverminderung kurze Zeit dauert, angewendet werden.

2. Anschließen an verschiedene Spannungen einer Akkumulatorenbatterie. Diese Methode wurde bei dem Anlaßverfahren S. 518 erörtert.

Digitized by Google

3. Anschließen an ein Dreileiternetz mit zwei verschiedenen Spannungen. Um eine möglichst große Geschwindigkeitsabstufung, wie sie z. B. Druckereipressen und Papiermaschinen verlangen, zu erhalten, werden öfters mit Vorteil Dreileiternetze mit zwei verschiedenen Spannungen angewandt. Es stehen dann für den Betrieb der Motoren diese zwei Spannungen und ihre Summe, d. h. die Spannung zwischen den Außenleitern, zur Verfügung, woraus sich drei entsprechende Geschwindigkeitsstufen ergeben.

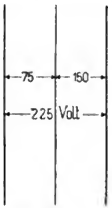


Fig. 468. Dreileiterschaltung mit verschiedenen Einzelspannungen für Tourenregulierung von Motoren.

In der Praxis gebräuchliche Zahlen sind 75 und 150 Volt zwischen je einem Außenleiter und dem Mittelleiter (Fig. 468), so daß sich zwischen den Außenleitern eine Spannung von 225 Volt ergibt. Hier wird also durch die Änderung der Spannung eine Tourenvariation im Verhältnis 1 : 3 erreicht.

Diese Methode gestattet nur eine Regulierung mit sehr großen Stufen: sie ist daher für sich allein meist nicht genügend und kann nur in Verbindung mit anderen Hilfsmitteln (Vorschaltwiderständen, Nebenschlußregulierung) angewandt werden.

4. Anwendung besonderer Regulieraggregate. Die bei den Anlaßverfahren besprochenen Anlaßaggregate (Abschn. 120) können für die Tourenregulierung als Regulieraggregate angewandt werden. Es läßt sich bei diesen Aggregaten jede Spannung an den Klemmen des Motors mit nur geringen Verlusten herstellen. Ein anderer Vorteil dieser Regulierung besteht darin, daß jeder Stellung des Magnetregulators des Reguliergenerators eine Tourenzahl des Lastmotors entspricht, welche nur wenig von der Belastung des Lastmotors abhängig ist.

Für einige Betriebe (z. B. bei den Motoren für Antrieb von Papiermaschinen) ist es jedoch notwendig, auch diese kleinen Schwankungen der Tourenzahl bei Änderung der Belastung zu beseitigen. Um dies zu erreichen, wird man erstens dafür Sorge tragen, daß das Aggregat mit konstanter Tourenzahl läuft. Ist der Aggregatmotor ein Gleichstrommotor, so kann man es durch Kompoundierung desselben erreichen, während, wenn der Aggregatmotor ein Asynchronmotor ist, die Tourenzahl nahezu konstant gehalten werden kann durch Einschaltung eines von einem Zentrifugalpendel beeinflußten Schlupfregulators. Ferner ist der Anlaßgenerator zu kompoundieren, um die Spannungsabfälle im Anlaßgenerator und in den Zuleitungen zum Lastmotor, sowie die ent-

Digitized by Google

magnetisierenden Amperewindungen des Anlaßgenerators zu kompensieren und eine derartige Änderung der Klemmenspannung des Lastmotors zu erzeugen, daß seine Tourenzahl sich nicht ändert. Die erforderliche Änderung der Klemmenspannung zum Konstanthalten der Tourenzahl bei Änderung der Belastung hängt bei einem fremderregten Motor davon ab, in welchem Verhältnis sich Spannungsabfall und Ankerrückwirkung ändern. (S. Bd. I, S. 615.) Im allgemeinen wird die Wirkung des Spannungsabfalles überwiegen und es wird bei zunehmender Belastung eine Zunahme der Klemmenspannung zum Konstanthalten der Tourenzahl erforderlich sein. Einem bestimmten Strom des Reguliergenerators entspricht auch eine bestimmte Amperewindungszahl des Hauptschlusses, so daß diese Regulierung nur dann für jede Spannung richtig wirkt, wenn der Generator schwach gesättigt ist.

Ist das Regulieraggregat gleichzeitig Pufferaggregat, so ist für die Wirkung des Schwungrades ein bestimmter Tourenabfall des Aggregates erforderlich. Bei den Betrieben, bei welchen Pufferaggregate zur Verwendung kommen, braucht man auf ein genaues Konstanthalten der Tourenzahl bei einer bestimmten Erregung des Generators und verschiedenen Belastungen im allgemeinen kein großes Gewicht zu legen. Ist der Tourenabfall des Pufferaggregates jedoch groß, oder ist die Erregermaschine des Generators direkt mit dem Aggregate gekuppelt, so kann der Abfall der Klemmenspannung des Generators und somit der Tourenzahl des Lastmotors bei Abnahme der Tourenzahl des Aggregates beträchtlich werden. Wir müssen dann auch hier Mittel anwenden, um den Einfluß der Tourenändernng des Aggregates zu kompensieren.

Durch Kompoundierung des Generators lassen sich in diesem Fall keine richtigen Resultate erzielen, da die Tourenänderung des Aggregates von der Größe und Dauer der Belastung, die Kompoundierung dagegen nur von der Größe des Stromes abhängig ist. Da der Generator mit verschiedenen Klemmenspannungen arbeitet, steht aber die Belastung zu der Stromstärke dieses Generators in keinem bestimmten Verhältnis. Wir müssen somit das Feld des Anlaßgenerators direkt von der Tourenzahl beeinflussen lassen.

Wird der Generator des Aggregates vom Netz oder von einer Batterie aus erregt, so kann man eine Erhöhung der Erregung beim Abfall der Tourenzahl durch Ausschalten von Widerstand im Erregerkreis bewirken. Um diese Regulierung zu verfolgen, nehmen wir zunächst an, daß die Magnetisierungskurve des Generators eine Gerade sei und wählen folgende Verhältnisse. Bei der höchsten Tourenzahl und einem Widerstand des Erregerkreises von

Digitized by Google

10 Ω sei die Klemmenspannung des Generators 100 Volt, verringert man jetzt den Widerstand des Erregerkreises auf 5 Ω, so wird bei der gleichen Tourenzahl die Klemmenspannung gleich 200 Volt. Jetzt nehmen wir weiter an, daß die Tourenzahl um 5% fällt, und daß dabei 0,5 Ω selbsttätig aus dem Erregerkreis geschaltet werden. Nun ist 0,5 Ω 5% von 10 Ω. Bei der Klemmenspannung von 100 Volt wird somit durch diese Regulierung der Einfluß des Tourenabfalles vollständig kompensiert, da die prozentuale Erhöhung des Erregerstromes gleich dem prozentualen Tourenabfall ist. Weiter ist 0,5 Ω 10% von 5 Ω. Bei der Klemmenspannung von 200 Volt werden wir somit eine Überkompoundierung von 5% erhalten, da die Erhöhung der Erregung 10% ist, während der Tourenabfall nur 5% beträgt. Ist der Generator normal gesättigt, so ist, um den Einfluß der Tourenänderung auf die Klemmenspannung des Generators zu kompensieren, gerade bei einer größeren Klemmenspannung eine größere Erhöhung der Erregung erforderlich als bei einer kleinen Klemmenspannung. Es wird somit in diesem Fall eine annähernd richtige Regulierung erzielt werden.

Wird der Generator von einer besonderen direkt mit dem Aggregate gekuppelten Maschine erregt, so kann man, falls er ungesättigt ist, eine vollständige Kompensation der Tourenschwankung erhalten. Ist die Magnetisierungskurve des Anlaßgenerators eine Gerade, so ist die erforderliche Erhöhung der Erregung, bei einer bestimmten Tourenzahl für verschiedene Spannungen, der Erregerstromstärke proportional. Um diese Erhöhung der Erregung hervorzurufen, braucht man somit nur die Klemmenspannung der Erregermaschine um einen bestimmten Prozentsatz zu erhöhen. Für jede Tourenzahl des Aggregates muß man somit eine bestimmte Klemmenspannung der Erregermaschine einstellen. Dies ist natürlich in einfacher Weise durch Änderung der Erregung der Erregermaschine möglich.

Es ist jetzt noch die Frage, wie die Änderung der Erregung des Generators oder seiner Erregermaschine bei Änderung der Tourenzahl des Aggregates selbsttätig gemacht werden kann. Erstens kann dies dadurch erfolgen, daß der Regulator einer der genannten Erregerkreise direkt von einem Zentrifugalpendel beeinflußt wird, oder zweitens dadurch, daß das Organ (Relais oder Schlupfregulator), welches die Tourenänderung des Aggregates bewirkt (s. Abschn. 116), mit dem genannten Regulator gekuppelt wird. Diese letztere Methode gibt deshalb richtige Resultate, weil bei den meisten Anordnungen von Pufferaggregaten eine bestimmte Stellung des Relais einer bestimmten Tourenzahl des Aggregates entspricht.

Digitized by Google

123. Tourenregulierung durch Änderung des Kraftflusses.

Die Änderung des Kraftflusses Φ eines Nebenschlußmotors wirkt, da dieser in der Hauptgleichung 183 im Nenner steht, im entgegengesetzten Sinne auf die Tourenzahl ein, wie die Änderung der induzierten EMK. Während daher bei den bisher betrachteten Methoden durch die Regulierung meist eine Herabsetzung der Tourenzahl bewirkt wurde, wird durch die vorliegende Regulierungsart eine Tourenerhöhung erreicht. Die Methode hat den großen Vorteil, daß sie den Wirkungsgrad des Motors sehr wenig beeinflußt.

Die Änderung des Kraftflusses Φ eines Nebenschlußmotors kann durch Änderung der Amperewindungszahl des Nebenschlusses, durch Änderung des magnetischen Widerstands oder durch Bürstenverstellung bewirkt werden.

Die einfachste und daher beinahe ausschließlich angewendete Methode ist die Schwächung des Erregerstroms mittelst in den Erregerkreis eingeschalteter Widerstände. Diese kommt auch stets dann zur Anwendung, wenn es sich darum handelt, die Tourenzahl des Nebenschlußmotors bei verschiedenen Belastungen konstant zu halten. Die Änderung der Amperewindungszahl durch Hintereinander- oder Parallelschalten der Nebenschlußspulen ist nicht zweckmässig, da das Umschalten der Spulen wegen ihrer großen Selbstinduktion mit Schwierigkeiten verknüpft ist. Eine Änderung der Windungszahl einer Spule hat auf die Amperewindungszahl der Nebenschlußmotoren keinen Einfluß.

Die Erhöhung der Tourenzahl, welche man durch Schwächung der Feldmagnete erreichen kann, ist begrenzt durch die Möglichkeit funkenfreier Kommutation. Es wirken hier nämlich zwei Umstände gleichzeitig ungünstig auf die Kommutation ein. Einerseits wird das kommutierende Feld geschwächt und andererseits wird durch das Ansteigen der Geschwindigkeit die Dauer des Kurzschlusses verkürzt. Es sind daher für eine Tourenänderung in weiten Grenzen Maschinen mit künstlicher Kommutation am Platze. Mit Wendepolmotoren ist eine Tourenregulierung durch bloße Änderung der Felderregung von 1:6 gut möglich, deshalb sind die anderen Methoden zur Verkleinerung des Kraftflusses fast vollständig durch die reine Nebenschlußregulierung unter Anwendung von Wendepolen verdrängt worden. (Siehe Abschn. 76.)

Digitized by Google

124. Tourenregulierung durch Änderung der Windungszahl.

Diese Art der Tourenänderung wird erreicht durch Anwendung von Ankern mit zwei Wicklungen und zwei Kommutatoren. Wählt man z. B. für die eine Wicklung eine Windungszahl $N_1 = 300$ und für die andere Wicklung $N_2 = 100$, so lassen sich hiermit vier verschiedene Windungszahlen und also auch vier verschiedene Geschwindigkeiten des Motors einstellen. Werden beide Wicklungen hintereinander geschaltet, so resultiert eine Windungszahl $N_1 + N_2 = 400$; N_1 allein gibt 300, N_2 allein 100; ferner kann man noch die beiden Wicklungen gegeneinander schalten, man erhält dann $N_1 - N_2 = 200$ wirksame Windungen. Nun ist die Tourenzahl, wie Gleichung 183 zeigt, für sonst gleiche Verhältnisse, der Windungszahl umgekehrt proportional; entspricht z. B. der Hintereinanderschaltung beider Wicklungen $N = 400$ eine Tourenzahl von 300, so sind außerdem noch die Tourenzahlen 600, 900 und 1200 mit der Maschine zu erreichen. Da der maximale Strom, der dem Motor zugeführt werden kann, in allen Fällen gleich ist, so verhalten sich die maximalen Drehmomente direkt wie die Windungszahlen (Gl. 182), während die Leistung des Motors für alle vier Schaltungen annähernd gleich bleibt, da ja $E_a J_a$ annähernd konstant ist.

Man erhält bei dieser Methode einen sehr weiten Regulierbereich, kann jedoch nur ganz bestimmte Tourenzahlen mit sehr großen Abstufungen einstellen. Um auch mit dazwischen liegenden Geschwindigkeiten arbeiten zu können, wird meist außerdem Feldregulierung angewandt. Beim Übergang von einer Windungszahl zur andern ist durch Vorschalten von Widerständen ein allzu starkes Anwachsen des Stromes zu verhindern.

125. Tourenregulierung durch Änderung der Polzahl.

Obwohl einige Ausführungen[1]) nach diesem System vorliegen, hat diese Methode keine praktischen Erfolge aufzuweisen. Da diese Regulierungsmethode außerdem unökonomisch ist, wollen wir nicht weiter auf sie eingehen.

126. Tandem-Anlaß- und Regulierverfahren.[2])

Für Betriebe, bei welchen eine große Tourenregulierung erforderlich ist, wie z. B. bei Papiermaschinenantrieben, verwendet die Bergmann Elektrizitätswerke A.-G. eine besondere Kombination

[1]) Z. V. D. I. 1896, S. 178.

[2]) Elektr. Bahnen u. Betriebe 1906, S. 359.

Digitized by Google

eines Hauptschluß- und eines Nebenschlußmotors. Die Motoren sind direkt miteinander gekuppelt oder in irgend einer anderen Weise zwangläufig miteinander verbunden. Die Kombination kann mit $^1/_{20}$ der vollen Tourenzahl arbeiten, ohne daß nennenswerte Verluste durch Vorschaltwiderstände entstehen. Fig. 471 zeigt sechs verschiedene Schaltstufen. Wie ersichtlich, werden die Hauptschluß- und Nebenschlußmotoren sowohl hintereinander als parallel geschaltet. Wir wollen deshalb kurz untersuchen, wie die Tourenzahl sich einstellt und wie die Leistung sich bei den beiden Schaltungen auf die Motoren verteilt. Wir nehmen für unsere Betrachtungen an, daß der Hauptschlußmotor ungesättigt sei, so daß wir schreiben können: induzierte EMK im Anker des Hauptschlußmotors

$$E_H = C_1 n J , \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (188)$$

induzierte EMK im Anker des Nebenschlußmotors

$$E_N = C_2 n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (189)$$

Wir betrachten jetzt zunächst die Hintereinander-Schaltung. Ist JR_H der Spannungsabfall im Anker, unter den Bürsten und im Hauptschluß des Hauptstrommotors und JR_N der Spannungsabfall im Anker und unter den Bürsten des Nebenschlußmotors, und ist weiter P die Netzspannung, so ist

$$P = E_H + E_N + J(R_H + R_N) = C_1 n J + C_2 n + J(R_H + R_N)$$

Hieraus ergibt sich die Tourenzahl

$$n = \frac{P - J(R_H + R_N)}{C_1 J + C_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (190)$$

Durch Einführung dieser Werte von n in die Gleichungen 188 und 189 können wir für jeden Belastungsstrom J die zugehörigen induzierten EMKe E_H und E_N finden. E_N ist direkt der Tourenzahl proportional. Aus der Gleichung 190 ist weiter zu ersehen, daß das Aggregat sich vollkommen wie ein Doppelschlußmotor verhält.

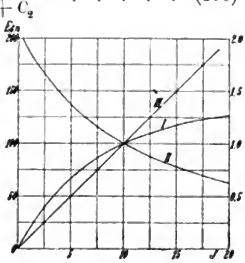


Fig. 469. Hintereinander-Schaltung eines Hauptschluß- und Nebenschlußmotors.

Da die beiden Motoren von demselben Strom durchflossen werden, verhalten sich ihre Leistungen wie ihre induzierten EMKe. Das Verhältnis Leistung des Hauptschlußmotors zur Leistung des Nebenschlußmotors wird somit gleich

Digitized by Google

$$\frac{E_H}{E_N} = \frac{C_1}{C_2} J$$

und somit J proportional. Unter den Annahmen: $P = 210$ Volt; $C_1 = 0{,}1$; $C_2 = 0{,}2$; $R_N + R_H = 1\ \Omega$ sind in Fig. 469 in Abhängigkeit vom Belastungsstrome J aufgetragen: in Kurve *I* die induzierte EMK E_H, in Kurve *II* die induzierte EMK E_N, in Kurve *III* das Verhältnis der Leistung des Hauptschlußmotors zur Leistung des Nebenschlußmotors. Die Kurve der Tourenzahl fällt mit der Kurve *II* der induzierten EMK E_N zusammen.

Bei Parallel-Schaltung der beiden Motoren erhalten wir folgende Bedingungsgleichungen

$$P = E_H + J_H R_H = (C_1 n + R_H) J_H \quad . \quad . \quad . \quad (191)$$

$$P = E_N + J_N R_N = C_2 n + J_N R_N \quad . \quad . \quad . \quad (192)$$

worin J_H und J_N bezw. die Ströme in den Hauptschluß- und Nebenschlußmotoren sind. Läßt man die Spannungsabfälle außer Betracht, so sieht man aus Gl. 192, daß die Tourenzahl unabhängig von der Belastung und für einen bestimmten Wert von C_2 konstant ist. Bei konstanter Tourenzahl muß jedoch, damit die Gl. 191 erfüllt ist, auch der Strom im Hauptschlußmotor konstant sein. Es folgt hieraus, daß der Hauptschlußmotor für alle Belastungen die gleiche Leistung abgibt, während der Nebenschlußmotor seine Leistung nach der Belastung richtet. Sinkt die Belastung unter die konstante Leistung des Hauptschlußmotors, so fängt der Nebenschlußmotor an generatorisch zu arbeiten und liefert den Überschuß an Leistung wieder in das Netz zurück. Für die früher angegebenen Verhältnisse (es ist $R_H = R_N$ angenommen) sind in Fig. 470 in Abhängigkeit vom totalen Belastungsstrome $(J_H + J_N)$ aufgetragen: in Kurve *I* der Strom J_H, in Kurve *II* der Strom J_N, in Kurve *III* das Verhältnis der Leistung des Hauptschlußmotors zur Leistung des Nebenschlußmotors und in Kurve *IV* die Tourenzahl.

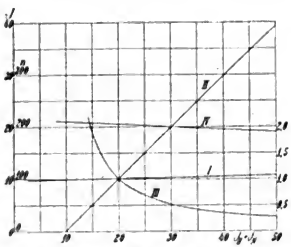


Fig. 470. Parallel-Schaltung eines Haupt- strom- und eines Nebenschlußmotors.

Wir wollen jetzt die verschiedenen Schaltstufen näher betrachten. Fig. 471 *I* stellt die Anlaufschaltung dar. Die Maschinen sind hintereinander geschaltet. Im Hauptkreis ist ein Widerstand *W* ein-

Digitized by Google

geschaltet und außerdem ist der Anker des Nebenschlußmotors auf einen Widerstande W_1 kurzgeschlossen. Der Nebenschlußmotor wirkt somit in dieser Schaltung generatorisch und bremst das Aggregat. Durch Betätigung eines Geschwindigkeitsreglers wird der Widerstand W_1 allmählich vergrößert, wodurch das Aggregat seine Tourenzahl erhöht. Der Widerstand W_1 wird schließlich abgeschaltet. Auf Stufe *II* liegt nur noch der Widerstand W im Hauptkreis. Dieser wirkt genau wie ein vorgeschalteter Widerstand bei einem Doppelschlußmotor. Auf Stufe *III* ist der Widerstand W ausgeschaltet und das Aggregat arbeitet wie oben erläutert. Auf Stufe *IV* sind die Maschinen parallel geschaltet und dem Anker des Nebenschlußmotors ist ein Widerstand W vorgeschaltet. Da die Tourenzahl des Aggregates sich hauptsächlich nach der Schaltung des Nebenschlußmotors richtet, so wird es sich in dieser Schaltung verhalten wie ein Nebenschlußmotor mit vorgeschaltetem Widerstande. Auf Stufe *V* ist der Widerstand W ausgeschaltet und dem Hauptschluß ein Widerstand W_2 parallel geschaltet. In dieser Schaltung verhält sich das Aggregat, wie oben erläutert, wie ein Nebenschlußmotor. Der Shunt W_2 ändert nur den Teil der Leistung, welchen der Hauptschlußmotor von der Gesamtleistung übernimmt, und zwar übernimmt der Hauptschlußmotor einen um so größeren Teil der Gesamtleistung, je kleiner der Widerstand W_2 ist.

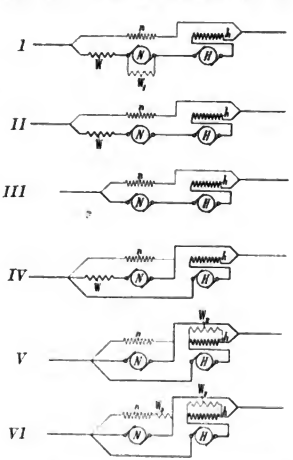


Fig. 471. Tandem-Anlaß- und Regulierverfahren der Bergmann-Elektrizitätswerke A.-G.

Auf Stufe *VI* ist ein Widerstand W_3 in den Erregerkreis des Nebenschlußmotors geschaltet. Das Aggregat wirkt jetzt wie ein Nebenschlußmotor mit Feldschwächung. Wird die Magnetwicklung des Hauptschlußmotors unverändert gelassen, während das Feld des Nebenschlußmotors geschwächt wird, so wird der Teil der Gesamtleistung, welchen der Hauptschlußmotor übernimmt, kleiner.

Digitized by Google

Neunundzwanzigstes Kapitel.

127. Verfahren zum Anlassen und zur Tourenregulierung von Hauptschlußmotoren.

Für das Anlassen und die Tourenregulierung von Hauptstrommotoren kommen die gleichen Faktoren in Betracht, wie bei den Nebenschlußmotoren. Die verschiedenen dort angegebenen Methoden können in sachgemäßer Übertragung auch hier angewandt werden. Wir wollen hier nur diejenigen zusammenfassen, welche sich in der Praxis bewährt haben.

A. Das Anlassen und die Regelung **durch Änderung der induzierten EMK** kann auf folgenden Arten geschehen:

1. Schaltung eines Widerstandes vor den Anker. Die Einwirkung des Vorschaltwiderstandes auf die Tourenzahl wird hier in geringerem Maße als bei Nebenschlußmaschinen (siehe S. 532) durch das auszuübende Drehmoment bedingt, und für geringe Sättigungen, bei welchen der Kraftfluß der Stromstärke proportional ist ($\Phi = c J_f$, entspricht einem bestimmten Vorschaltwiderstande R eine bestimmte Tourenverminderung CR, was man leicht aus folgender Berechnung entnehmen kann. Gl. 183, S. 484 geht für den betrachteten Fall über in

$$n = c' \frac{E_a}{\Phi} = \frac{c'}{c} \frac{E_a}{J} = C \frac{E_a}{J}$$

$$n = C \frac{P - J(R_2 + R)}{J} = C \frac{P - J R_2}{J} - C R.$$

In der Endgleichung stellt das erste Glied die Tourenzahl dar, mit welcher der Motor bei der betreffenden Stromstärke ohne Vorschaltwiderstand laufen würde, und CR ist die durch den Vorschaltwiderstand hervorgerufene Tourenverminderung, welche, wie man sieht, von der Stromstärke unabhängig ist. Hieraus kann man erkennen, daß der Vorschaltwiderstand das Durchgehen des Motors bei Entlastung nicht verhindert, weil er die hohen Touren-

Digitized by Google

zahlen, die der Motor dann annimmt, eben nur um einen konstanten, verhältnismäßig kleinen Wert vermindert.

2. Serie- und Parallelschaltung von zwei Motoren. Diese Methode ist sehr verbreitet, sie wird fast allgemein beim Betrieb von Straßenbahnwagen mit zwei Motoren angewandt.

Beim Anfahren werden hier die beiden Motoren zuerst hintereinander geschaltet. Sie brauchen dabei einen bedeutend kleineren Vorschaltwiderstand, als ein Motor allein benötigen würde, da jeder Motor nur die halbe Spannung erhält und die Eigenwiderstände beider Motoren hintereinander geschaltet sind. Ist die halbe Geschwindigkeit erreicht, so werden beide Motoren unter Vorschaltung eines Widerstandes parallel geschaltet; ihre Anzugskraft bleibt daher die gleiche und die Geschwindigkeit erhöht sich allmählich auf die normale.

Die Gesamtleistung der beiden hintereinander geschalteten Motoren $\left(2\frac{E_k}{2}J\eta\right)$ ist natürlich nur halb so groß, wie die Leistung bei Parallelschaltung $(2\,E_k J\eta)$.

Ein Beispiel einer Schaltung nach dem Serie-Parallelsystem gibt Fig. 472, in der die Anlaßmethode dargestellt ist, welche die Westinghouse Mfg. Co. bei Bahnmotoren benutzt. In Schaltstufe 1 werden beide Motoren hintereinander unter Vorschalten eines Anlaßwiderstandes (V) an das Netz gelegt. In den beiden folgenden Stufen wird der Anlaßwiderstand ausgeschaltet. In den Stufen 4, 5 und 6 wird durch Schwächung des Feldes des einen Motors (I) bewirkt, daß die Spannung desselben sinkt und der andere Motor (II) allmählich auf die volle Netzspannung kommt. Dieser letztere arbeitet in Stufe 7 allein. In Stufe 8 wird Motor II mit einem Vorschaltwiderstand parallel zu I zugeschaltet; der Vorschaltwiderstand soll dabei verhüten, daß beim Parallelschalten ein Stoß auftritt; ohne ihn würde nämlich Motor II sofort die gleiche Stromstärke wie Motor I aufnehmen, und die gesamte Zugkraft, die auf den Wagen ausgeübt wird, würde plötzlich verdoppelt werden. Stufe 10 stellt die Schaltung für volle Fahrt dar.

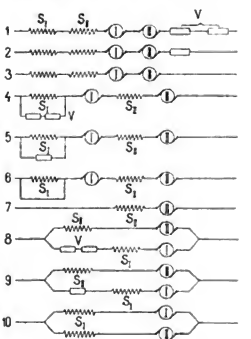


Fig. 472. Schaltstufen beim Anlassen von zwei Motoren nach dem Serie-Parallelsystem.

Digitized by Google

B. Die Regulierung der Tourenzahl **durch Änderung des Kraftflusses** kann wie folgt geschehen.

a) Durch Anordnung eines Regulierwiderstandes (Shunt) parallel zur Erregerwicklung.

b) Durch Abschalten von einzelnen Windungen der Erregerwicklung. Diese beiden Methoden bieten wenig Bemerkenswertes.

c) Durch Serie- und Parallelschaltung der Erregerspulen. Diese Schaltung ist durch die Sprague Compagnie eingeführt worden. Die Feldwicklung wird gewöhnlich in drei Abteilungen geteilt (Fig. 473). Beim Einschalten werden sämtliche Windungen hintereinander geschaltet; außerdem ist ein Vorschaltwiderstand *V* vorgesehen (Stufe 1); die Stromstärke ist dann in allen Erregerspulen gleich der Ankerstromstärke und das Anzugsmoment wird am größten. In Stufe 2 ist der Vorschaltwiderstand abgeschaltet. In Stufe 3 wird die Spule *A* kurzgeschlossen. Nr. 4 und 7 sind Zwischenstufen, die gegenüber den vorhergehenden keine Änderung bedeuten und sich nur mit Rücksicht auf die Schaltapparate ergeben. Um einen Unterschied in der Erregung zwischen Stufe 4 und 5 zu erhalten, muß man die Windungszahl der Spule *B* etwas größer wählen, als die der beiden andern. Bei der letzten Stufe 8 sind alle drei Spulen parallel geschaltet, jede führt nur einen Teil des Ankerstromes, und die Amperewindungszahl ist etwa auf $^1/_3$ vermindert. Die Tourenzahl steigt also auf das Dreifache, während die Zugkraft entsprechend sinkt.

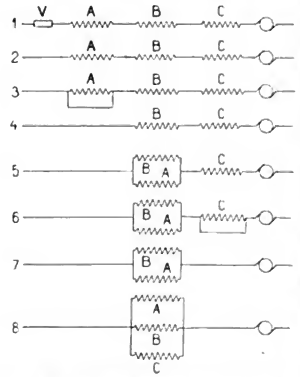


Fig. 473. Schema der Sprague-Schaltung.

Die Geschwindigkeitsregulierung durch Umschalten der Magnetspulen hat bei Verwendung von nur einem Motor zum Antrieb den Vorteil, daß sie sehr ökonomisch arbeitet. Als Nachteil ist zu bezeichnen, daß die Erregerspulen gleichzeitig als Anlaßwiderstände dienen und so der entsprechende Effektverlust, der sonst in den Widerstandsapparaten auftritt, eine vergrößerte Erwärmung der

Digitized by Google

Motoren selbst veranlaßt; auch werden die Motoren etwas größer als bei reiner Widerstandsschaltung.

Beim Antrieb mit zwei Motoren (Schaltungsschema Fig. 474) kommt hierzu noch der Umstand, daß es hier infolge ungleicher Feldstärke leicht vorkommen kann, daß sich der Strom nicht gleichmäßig auf die beiden Anker verteilt und der eine Motor überlastet und unzulässig erwärmt wird. Es ist nämlich fast unmöglich, die Felder beider Motoren vollständig gleich zu machen; einerseits

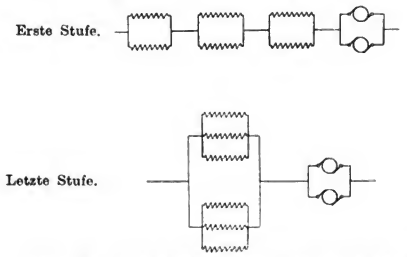


Fig. 474. Schema der Sprague-Schaltung für zwei Motoren.

werden die Widerstände der Magnetspulen meist etwas verschieden sein, was z. B. schon leicht durch ungleiche Kontaktwiderstände im Kontroller, in welchem ja der Strom in die einzelnen Spulen verteilt wird, veranlaßt werden kann, und ferner können auch Unterschiede zwischen den Lufträumen beider Motoren vorkommen. Nehmen wir z. B. zwei 25 PS-Motoren an, welche bei 500 Volt Klemmenspannung ca. 40 Amp. verbrauchen, und setzen den Fall, daß aus irgend einer Ursache ihre Felder um $2\,\%$ verschieden seien. Der Ankerwiderstand jedes Motors betrage $0{,}5\ \Omega$, der Widerstand der Feldwicklung $0{,}9\ \Omega$. Bei gleicher Feldstärke würde dann in jedem der beiden Motoren eine EMK

$$E_a = 500 - 0{,}45 \cdot 80 - 0{,}5 \cdot 40 = 444 \text{ Volt}$$

induziert werden. Sind dagegen die Feldstärken um $2\,\%$ verschieden, so werden die induzierten EMKe, da ja die Tourenzahlen gleich sind, auch um $2\,\%$, also etwa um 9 Volt verschieden sein. Es sei z. B. $E_{a1} = 439{,}5$ Volt und $E_{a2} = 448{,}5$ Volt. Dann wird

$$J_1 = \frac{500 - 0{,}45 \cdot 80 - 439{,}5}{0{,}5} = 49 \text{ Amp.}$$

und

$$J_2 = \frac{500 - 0{,}45 \cdot 80 - 448{,}5}{0{,}5} = 31 \text{ Amp.}$$

Digitized by Google

Die beiden Stromstärken sind also um 45% verschieden. Der stärker belastete Motor wird nun mehr erwärmt als der andere, infolge davon steigt sein Feldwiderstand noch mehr an, seine Feldstärke und EMK sinken weiter und die Stromverteilung zwischen beiden Ankern wird noch ungünstiger. Eine einmal eingetretene Verschiebung der Belastung wird sich daher von selbst immer mehr steigern. Die Parallelschaltung zweier Anker, wie sie die Sprague-Regulierung mit sich bringt, ist daher zu vermeiden; sie ist bei Straßenbahnen, wo sie früher angewendet wurde, heute gänzlich verlassen.

Digitized by Google

Dreißigstes Kapitel.

128. Das Dreileitersystem. — 129. Spannungsteilung durch Akkumulatoren und Ausgleichmaschinen. — 130. Maschinen mit zwei Ankerwicklungen und zwei Kommutatoren. — 131. Spannungsteilung, System von Dolivo-Dobrowolsky. — 132. Dreileitermaschine von Ossanna. — 133. Dreileitermaschine von Dettmar.

128. Das Dreileitersystem.

Das im Jahre 1882 von J. Hopkinson erfundene Dreileitersystem hat den Zweck, unter Beibehaltung der durch die Glühlampen bedingten Verbrauchsspannung die Verteilungsspannung zu verdoppeln. Dies wird dadurch erreicht, daß die Konsumstellen in zwei Abteilungen geteilt und beide Hälften, wie Fig. 475 zeigt, so hintereinander geschaltet werden, daß sämtliche Verbraucher der einen Hälfte mit allen Verbrauchern der andern Hälfte verbunden sind. Das Dreileitersystem stellt sonach eine Kombination von Parallel- und Serieschaltung dar.

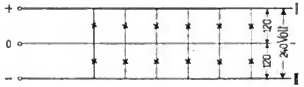


Fig. 475. Schema der Dreileiterschaltung.

Nimmt man zunächst an, daß in beiden Netzhälften eine gleiche Anzahl gleich großer Belastungen eingeschaltet seien, so kann man immer je zwei derselben einander zuordnen und sie unabhängig von den andern hintereinandergeschaltet denken, so daß der Strom z. B. durch Leitung I zufließen und durch Leitung II abfließen wird; die Mittelleitung bleibt dabei stromlos. Überwiegt dagegen die Belastung in der einen Netzhälfte, so muß die Differenz der Ströme beider Netzhälften durch die Mittelleitung fließen.

Die Spannung, welche dieser Differenzstrom im Widerstand des Mittelleiters verbraucht, ist der Spannung der stärker belasteten Netzhälfte entgegengesetzt gerichtet und erzeugt einen Spannungsabfall; während sie sich zu der Spannung der schwächer belasteten Netzhälfte addiert und eine Spannungserhöhung bewirkt.

Digitized by Google

Aus diesem Grunde ist eine Regulierung der Spannung jeder Netzhälfte unabhängig von der anderen erwünscht.

Die Spannungsteilung. Für die Teilung der Gesamtspannung sind eine ganze Reihe von Methoden vorgeschlagen und ausgeführt worden.

Eine in ihrer Wirkungsweise vollkommene Spannungsteilung wurde bereits von Hopkinson angegeben. Sie besteht in der Anwendung von zwei hintereinander geschalteten Generatoren, von deren Verbindungsleitung der Mittelleiter abgezweigt wird. Die Spannung der beiden Abteilungen des Netzes kann hierbei unabhängig reguliert werden. Jedoch hat die Methode bei kleineren Anlagen den Nachteil, daß statt einer größeren Maschine zwei halb so große aufgestellt werden müssen, was eine Verteuerung und Komplikation der Anlage und eine Verschlechterung des Wirkungsgrades mit sich bringt. Man hat daher versucht, diesem Übelstande abzuhelfen und auch bei Dreileiteranlagen den Strom in einer Maschine zu erzeugen.

Es sind hier zwei Wege möglich. Entweder man stellt einen normalen Generator für die Spannung zwischen den Außenleitern auf und teilt die Spannung außerhalb desselben durch besondere Hilfsmittel, oder die Spannungsteilung wird an der Maschine selbst vorgenommen.

Die Spannungsteilung außerhalb der Maschine geschieht durch Akkumulatoren oder durch sogen. Ausgleichmaschinen. In vielen Fällen werden beide Einrichtungen gleichzeitig angewandt.

129. Spannungsteilung durch Akkumulatoren und Ausgleichmaschinen.

a) Bei der Spannungsteilung durch Akkumulatoren wird der Mittelleiter an den Mittelpunkt der Batterie gelegt (Fig. 476); die Regulierung geschieht durch je einen Zellenschalter für jede Hälfte. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, daß bei ungleicher Belastung der beiden Netzhälften die eine Abteilung der Batterie stärker entladen wird als die andere. Da bei der Ladung die beiden Hälften in Serie geschaltet werden, also denselben Ladestrom erhalten, wird dann jeweils die eine Hälfte überladen werden. Man hilft sich vielfach so, daß man kleinere Teile der Belastung, z. B. die Beleuchtung der Zentrale, derart anordnet, daß sie auf die eine oder die andere der beiden Hälften geschaltet werden können. Enthält diese Beleuchtungsanlage auch Bogenlampen, so ist darauf zu achten, daß die Stromrichtung nicht umgekehrt wird. Ein weiterer Nachteil dieser Anordnung ist der, daß bei Betriebs-

Digitized by Google

unfähigkeit der Batterie der ganze Betrieb der Anlage eingestellt werden muß.

b) Eine vorteilhaftere Methode der Spannungsteilung ist die Anwendung von Ausgleichmaschinen, und diese bilden allein oder in Verbindung mit Akkumulatoren die verbreitetste Art der Spannungsteilung. Die Ausgleichmaschinen sind zwei direkt gekuppelte Nebenschlußmaschinen, die einander möglichst gleich sind. Ihre Anker- und Erregerwicklungen werden in Serie zwischen die Außenleiter geschaltet und die Mittelleitung zwischen den Ankern angeschlossen (Fig. 477).

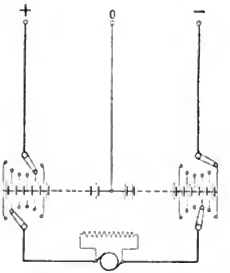


Fig. 476. Spannungsteilung durch Akkumulatoren.

Bei gleicher Belastung J in den beiden Netzhälften laufen beide Ausgleichmaschinen mit demselben Strome J_0 als Motoren leer. Die Hauptmaschine liefert dann einen Strom $J + J_0$.

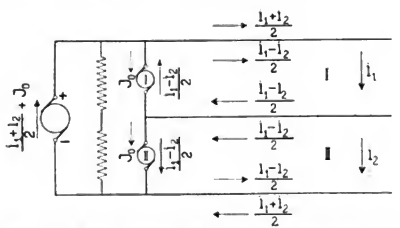


Fig. 477. Spannungsteilung durch Ausgleichmaschinen.

Ist die Belastung in beiden Hälften verschieden, so kann man sich durch eine Superposition der Ströme, wie sie in Fig. 477 dargestellt ist, einen Überblick über die Wirkungsweise des Systems verschaffen. Beide Netzhälften sind gleichmäßig mit dem Strom $\frac{i_1 + i_2}{2}$ belastet. Die Verschiedenheit der Belastungen und des Spannungsabfalls wird durch einen Strom $\frac{i_1 - i_2}{2}$ hervorgerufen, der in beiden Netzhälften über dem erstgenannten gelagert ist.

Die Superposition gilt für ein symmetrisches gleichmäßig erregtes Aggregat. In der einen Maschine (I) ist der Strom $\frac{i_1 - i_2}{2}$

Digitized by Google

dem Leerlaufstrom J_o entgegengesetzt; diese läuft daher nicht mehr als Motor, sondern als Generator, welcher einen Strom $\frac{i_1 - i_2}{2} - J_o$ erzeugt und von der andern Maschine (II), in welcher der Strom $\frac{i_1 - i_2}{2}$ den Leerlaufstrom verstärkt, angetrieben wird. Von der in jeder der Ausgleichmaschinen induzierten Spannung ist daher in der einen Hälfte der Spannungsabfall im Anker $R_g \left(\frac{i_1 - i_2}{2} - J_o\right)$ abzuziehen (Generator), während bei der andern $R_g \left(\frac{i_1 - i_2}{2} + J_o\right)$ zu ihr hinzuzufügen ist (Motor). Die Spannung wird also nicht mehr gleichmäßig geteilt, und zwar wirkt diese Verschiedenheit in demselben Sinne, wie die Spannungsverschiebung infolge des ungleichen Spannungsabfalls im Netz.

Diesem Übelstande kann man zum Teil durch wechselseitige Erregung der Maschinen abhelfen, indem man die Maschine I von der Netzhälfte II aus erregt und entsprechend II von I aus. Die Erregung des stark belasteten Zweiges mit niederer Spannung wird dann, da sie an der höheren Spannung des schwach belasteten Zweiges liegt, vergrößert, während die andere entsprechend verkleinert wird. Ein vollständiger Ausgleich kann jedoch mit dieser Schaltung nicht erzielt werden, da ja eine Verschiedenheit der Erregerstromstärke das Bestehen einer Spannungsdifferenz zwischen den beiden Netzhälften voraussetzt.

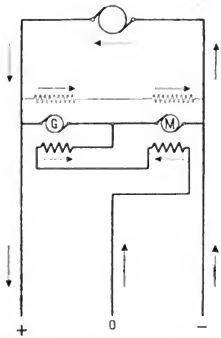


Fig. 478. Kompoundierte Ausgleichmaschinen.

Bedeutend wirksamer ist eine Kompoundierung der Maschinen (Fig. 478), welche der Firma Siemens & Halske patentiert wurde. Der Mittelleiterstrom, welcher seine Größe und Richtung mit dem Belastungsunterschied ändert, wird so um die Magnete geführt, daß er das Feld der als Motor arbeitenden Maschine schwächt und das Feld der andern, die gerade als Generator läuft, verstärkt. Kehrt der Strom im Mittelleiter um, so vertauschen gleichzeitig beide Maschinen ihre Rolle und die Wirkung bleibt unverändert. Infolge davon wird die Spannung an den Klemmen des Generators steigen, während die Spannung des Motors fallen wird. Bei geringer Sättigung der

Digitized by Google

Maschinen und passender Bemessung der Hauptschlußwicklung kann man durch diese Schaltung erreichen, daß der zusätzliche Spannungsabfall in den Maschinen und Speiseleitungen vollständig kompensiert und die Spannung an den Speisepunkten konstant und in beiden Hälften gleich gehalten wird.

Allen Ausgleichmaschinen haftet jedoch der Übelstand an, daß sie die Anlagekosten erhöhen, da sie für etwa 10% der maximalen Leistung der Zentrale zu bemessen sind, und zweitens werden durch ihren Leerlaufstrom, der ja ganz unabhängig von der Belastung stets aufzubringen ist, die Betriebskosten nicht unbedeutend erhöht. Man hat daher versucht, die Spannungsteilung direkt an der Maschine vorzunehmen.

130. Maschinen mit zwei Ankerwicklungen und zwei Kommutatoren.

Am nächstliegenden ist es, die Hopkinson'sche Anordnung der zwei hintereinander geschalteten Generatoren dadurch zu vereinfachen, daß man die Wicklungen beider Maschinen auf einem Anker unterbringt und diesen mit zwei Kommutatoren versieht. Eine Regulierung der Spannung in den einzelnen Netzhälften ist bei dieser Anordnung natürlich nicht möglich. Da die induzierte Spannung in beiden Wicklungen gleich ist, beträgt die Klemmenspannung der einen Hälfte $E_a - i_1 R_g$, und die der andern $E_a - i_2 R_g$; es ergibt sich also eine Differenz für die Spannungsteilung $(i_1 - i_2) R_g$.

131. Spannungsteilung, System von Dolivo-Dobrowolsky.[1])

Eine sehr sinnreiche Lösung hat von Dolivo-Dobrowolsky angegeben. Er verbindet, wie aus der schematischen Darstellung seiner Anordnung, Fig. 479, ersichtlich ist, zwei gegenüberliegende Punkte der Armatur durch eine auf einen Eisenkern gewickelte Spule, eine sogen. Drosselspule, und zweigt den Mittelleiter in der Mitte derselben ab. Zwischen jeder der Bürsten und dem Abzweigepunkt D, welcher genau in der Mitte der Drosselspule liegt, herrscht dann konstant die halbe Klemmenspannung der Maschine $\frac{P}{2}$, da die Spannung zwischen dem einen Endpunkt C und dem Mittelpunkt D stets gleich der Spannung zwischen D und E sein muß. Ferner ist aus Symmetriegründen die Spannung zwischen AC stets

[1]) ETZ 1894, S. 323.

Digitized by Google

gleich der Spannung EB, welche Lage die Drosselspule auch einnehmen mag. Es gilt also immer

$$AC + CD = DE + EB.$$

Nun ist die Spannung $AB = P$; folglich muß $AD = DB$ gleich $\frac{P}{2}$ sein.

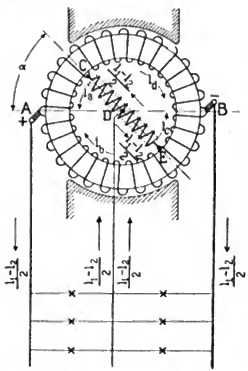


Fig. 479. Spannungsteilung, System von Dolivo-Dobrowolsky.

Diese Ableitung gilt für Leerlauf und für Belastung, so lange beide Zweige genau symmetrisch belastet sind. In der Drosselspule fließt dabei, entsprechend der wechselnden Spannung zwischen den Anschlußpunkten C und E, ein Wechselstrom J_w (der Magnetisierungsstrom), welcher jedoch wegen der großen Selbstinduktion der Spule nicht groß ist und infolge davon auch nur geringe Stromwärmeverluste ergibt.

Werden die beiden Netzhälften ungleich belastet, so lagert sich über den Wechselstrom noch der Gleichstrom des Mittelleiters, und es tritt ein Spannungsunterschied zwischen den beiden Zweigen auf. Mit Hilfe der bereits oben angewandten Superposition kann man diesen leicht berechnen (Fig. 479). Der den beiden Netzhälften gemeinsame Strom $\frac{i_1 + i_2}{2}$ bewirkt einen für beide Zweige gleichen Spannungsabfall im Anker und ist der Berechnung von P zugrunde zu legen:

$$P = E_a - \frac{i_1 + i_2}{2} \cdot R_a.$$

Der übergelagerte Mittelleiterstrom $2 \cdot \frac{i_1 - i_2}{2}$, welcher die Verschiedenheit der Spannung hervorruft, verteilt sich wegen der Symmetrie der Anordnung gleichmäßig auf die beiden Hälften der Drosselspule und fließt durch den Anker zur positiven bezw. negativen Bürste. Der Spannungsabfall in der Drosselspule wird gleich

$$DC = \frac{i_1 - i_2}{2} \cdot \frac{R_d}{2},$$

wenn der gesamte Widerstand der Drosselspule mit R_d bezeichnet

Digitized by Google

wird. Der Spannungsabfall im Ankerteile CA variiert während einer Umdrehung. Setzt man den gesamten Ankerwiderstand gleich R_a, so wird der Widerstand des Stückes AC gleich

$$x = \frac{\alpha}{\pi} \cdot 2 R_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (193)$$

und der des Stückes CB gleich $2 R_a - x$. Der Spannungsabfall CA berechnet sich dann leicht aus folgenden Gleichungen, welche sich aus Fig. 479 ergeben. Aus der Symmetrie der Anordnung folgt:

$$i_a \cdot x = i_c \cdot x$$

und

$$i_b (2 R_a - x) = i_d (2 R_a - x).$$

Ferner muß nach den Kirchhoff'schen Sätzen sein:

$$i_a \cdot x - i_b (2 R_a - x) + i_c x - i_d \cdot (2 R_a - x) = 0,$$

$$i_a + i_b = \frac{i_1 - i_2}{2}.$$

Hieraus ergibt sich

$$i_a \cdot x = \frac{i_1 - i_2}{2} \left(\frac{2 R_a x - x^2}{2 R_a} \right).$$

Der mittlere Spannungsabfall $\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} AC \cdot d\alpha$ wird gleich

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_a \cdot x \cdot d\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{i_1 - i_2}{2} \left(\frac{2 R_a x - x^2}{2 R_a} \right) \cdot d\alpha$$

bezw. mit Rücksicht auf Gl. 193

$$= \frac{1}{2 R_a} \cdot \frac{i_1 - i_2}{2} \int_0^{2 R_a} \frac{2 R_a \cdot x - x^2}{2 R_a} \cdot dx$$

$$= \frac{1}{3} \frac{i_1 - i_2}{2} R_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (194)$$

Der gesamte mittlere Spannungsabfall zwischen D und A wird daher gleich

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_2}{2} \left(\frac{1}{3} R_a + \frac{1}{2} R_d \right). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (195)$$

Der Spannungsabfall zwischen D und B ist diesem numerisch gleich, wirkt jedoch in bezug auf das Netz in entgegengesetztem Sinne, indem er sich zu $\frac{P}{2}$ addiert, wenn DA davon zu subtrahieren

Digitized by Google

ist. Die Spannungsdifferenz zwischen beiden Netzhälften wird daher gleich den doppelten Spannungsabfall DA

$$\Delta E = (i_1 - i_2)\left(\frac{1}{3} R_a + \frac{1}{2} R_d\right). \quad . \quad . \quad . \quad (196)$$

Um eine möglichst gleichmäßige Spannungsteilung zu erhalten, wird man daher den Ohm'schen Widerstand der Drosselspule R_d möglichst klein machen.

Die Anordnung gestattet keine selbständige Regulierung der beiden Hälften, so daß man die angeführte Spannungsdifferenz und die durch den Spannungsabfall, welchen der Mittelleiterstrom hervorbringt, bedingte Verschiedenheit nur durch besondere Hilfsmittel, wie Hauptstromregulierwiderstände in den Außenleitern oder besser Zusatzmaschinen in der Mittelleitung kompensieren kann.

Praktisch wird das System so ausgeführt, daß die Maschine mit zwei Schleifringen versehen wird, von denen jeder mit den verschiedenen Ankerstromzweigen an Punkten gleichen Potentials verbunden wird, wobei die Anschlußpunkte der beiden Ringe gegenseitig um 180 elektrische Grade verschoben sind.

An die beiden Ringe wird der feststehende, wie ein Transformator ausgeführte Spannungsteiler mittels Bürsten angeschlossen. Die beiden Hälften der Spule (CD und ED) werden gemischt oder übereinander gewickelt, so daß das Fließen des Gleichstromes keinerlei Änderung des magnetischen Zustandes des Eisenkerns verursacht.

Wie Prof. Sengel[1]) gezeigt hat, können anstatt zwei um 180 elektrische Grade verschobene Punkte der Wicklung, allgemein m Punkte, die um $360/m$ elektrische Grade räumlich verschoben sind, an einen m-phasigen Spannungsteiler angeschlossen werden. Für $m = 3$ würde man somit drei Schleifringe und einen Spannungsteiler (Transformator) mit drei Spulen und drei Eisenkernen erhalten.

132. Dreileitermaschine von Ossanna.

Ossanna[2]) ordnet auf dem Anker der Gleichstrommaschine zwei Wicklungen I und II (Fig. 480 und 481) an, von welchen eine an die Lamellen angeschlossen wird und die andere in sechs Teilen aufgeschnitten und als Dreiphasenwicklung geschaltet wird.

Der Kreis II, Fig. 480, stellt unter Annahme einer sinusförmigen Feldverteilung den Potentialkreis der nichtaufgeschnittenen Wicklung dar (s. S. 20, Bd. I). Wir können jetzt diese Wicklung in sechs

[1]) ETZ 1898, S. 544.
[2]) Z. f. E. 1899, S. 349.

Digitized by Google

Punkten aufschneiden und die Wicklungsteile 1 bis 6, wie Fig. 481 zeigt, zusammensetzen.

Die Punkte A', B' und C' der aufgeschnittenen Wicklung haben dann das gleiche Potential wie die Punkte A, B und C der Gleichstromwicklung und wir dürfen sie somit an diesen Punkten mit der Wicklung I verbinden, deren Potentialkreis durch Kreis I dargestellt ist. Der Sternpunkt S der Dreiphasenwicklung halbiert dann die Spannung zwischen den Bürsten, da S immer den Mittelpunkt des Potentialkreises bildet. Wir können somit den Mittelleiter des Dreileitersystems mittelst eines Schleifringes an den Sternpunkt S anschließen. Ist das Netz symmetrisch belastet, so führt die Dreiphasenwicklung keinen Strom. Bei unsymmetrischer Belastung fließt der Strom des Mittelleiters durch die Dreiphasenwicklung in die Gleichstromwicklung zurück. Durch den Spannungs-

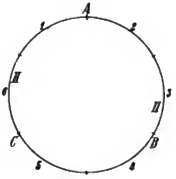


Fig. 480.

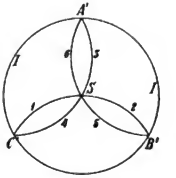


Fig. 481.

Schaltung der Wicklungen der Dreileitermaschine von Ossanna.

abfall dieses Stromes in den beiden Wicklungen wird jetzt die Spannung zwischen den Außenleitern nicht mehr genau halbiert. Eine genaue Berechnung dieser Spannungsabfälle wird dadurch erschwert, daß der Strom sich sowohl in der Dreiphasen-, wie in der Gleichstromwicklung je nach der Stellung der Punkte A', B' und C' gegenüber den Bürsten anders verteilt und somit für die Berechnung der Stromverteilung auch die Selbstinduktion der Wicklungen in Betracht gezogen werden muß.

Nach vorliegenden Angaben[1]) soll bei einer Verschiedenheit der Belastung der Netzhälften um 25% der Maschinenleistung die Differenz der Spannungen der beiden Netzhälften noch innerhalb zulässiger Grenzen bleiben.

Bei der Ausführung wird den beiden Wicklungen I und II verschiedener Querschnitt gegeben. Der Querschnitt der Gleich-

[1]) Strecker, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, S. 362.

Digitized by Google

stromwicklung I wird für die volle Maschinenstromstärke bemessen, während der Querschnitt der Dreiphasenwicklung II nur für den Strom in dem Mittelleiter bemessen wird.

133. Dreileitermaschine von Dettmar.[1])

Legt man an einem Gleichstromgenerator in der Mitte zwischen den positiven und negativen Bürsten noch eine weitere Bürste auf, so wird durch diese die Gesamtspannung ebenfalls in zwei Teile geteilt. Um das Auflegen dieser Bürste zu ermöglichen, muß man jedoch für sie eine schwach induzierte Zone schaffen, also z. B. die Pole teilen. Auf diesem Prinzip beruht die Dreileitermaschine, welche G. Dettmar im Jahre 1894 angegeben hat, nachdem Kingdon bereits eine ähnliche, jedoch praktisch nicht brauchbare Anordnung erfunden hatte.

Die Maschine ist in Fig. 482 schematisch dargestellt. Das Magnetgestell zeigt eine vierpolige Type, ist aber in Wirklichkeit, da ja die Pole geteilt sind, zweipolig, und auch der als Trommelanker ausgeführte Anker ist zweipolig gewickelt. Bei mehrpoligen Maschinen ist die Schaltung analog auszuführen; es sind immer zwei Südpole und zwei Nordpole nebeneinander zu legen und zwischen den gleichnamigen Polen die Mittelleiterbürsten aufzulegen. Die Erregung ist so geschaltet, daß $N_{II}\,S_I$ und $N_I\,S_{II}$ zusammen je einen Erregerstromkreis bilden. Denkt man sich vorerst den Anker stromlos und beide Erregerzweige gleichmäßig erregt, so wird sich ein Kraftfluß Φ_m ergeben, wie ihn Fig. 482 zeigt. Joch und Ankerquerschnitt führen, wie man sieht, den vollen Kraftfluß eines Polstückes; äußerlich wird sich die Maschine daher an ihrem verhältnismäßig schweren Joch und Anker erkennen lassen.

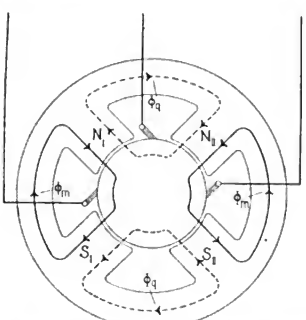


Fig. 482. Dreileitermaschine von Dettmar.

Eine Verstärkung der Erregung der Pole N_{II} und S_I hat auf

[1]) ETZ 1897, S. 55 und 230.

Digitized by Google

den Kraftfluß der beiden anderen Pole N_I und S_{II} keinen Einfluß, da die magnetomotorische Kraft der Spule N_{II} in bezug auf S_{II} bezw. N_I entgegengesetzt wirkt, wie die magnetomotorische Kraft der Spule S_I. Am besten kann man dies dadurch darstellen, daß man sich den Kraftfluß von N_{II} mit S_I und den von N_I mit S_{II} verkettet denkt, wie dies in Fig. 483 durch den stark ausgezogenen Linienzug $N_{II} S_I$ und den schwach ausgezogenen $N_I S_{II}$ gezeigt ist. Beachtet man nun, daß bei der gegebenen Schaltung der Zweig 01 der Ankerwicklung nur durch die Pole $N_I S_{II}$ und der Zweig 02 nur durch die Pole $N_{II} S_I$ beeinflußt wird, so ergibt sich, daß die Spannung jedes Zweiges unabhängig vom anderen reguliert werden kann.

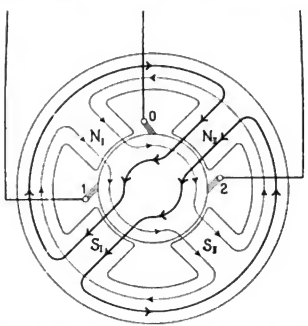


Fig. 483. Kraftflußverkettung in der Dettmar'schen Dreileitermaschine.

Besonders bemerkenswert ist bei dieser Maschine der Einfluß der Ankerrückwirkung. Der von den quermagnetisierenden Windungen erzeugte Kraftfluß Φ_q (Fig. 482) nimmt nämlich hier seinen Weg durch das Joch und verstärkt die Pole N_{II} und S_I, während er die Pole N_I und S_{II} schwächt. Es ist daher bei steigender Belastung die Erregung im Zweige $N_I S_{II}$ zu verstärken, während sie im Zweige $N_{II} S_I$ verringert werden muß. Für die genaue Spannungsteilung und die Vermeidung von Spannungsschwankungen ist dieses Verhalten ungünstig, da beim Ansteigen der Belastung die Teilung ungleich wird. Namentlich wird dies der Fall sein, wenn die Belastung gerade in dem Teil vergrößert wird, in welchem durch die starke Ankerrückwirkung die Spannung an sich schon erniedrigt wird. Zum Teil kann man diesen Fehler dadurch kompensieren, daß man die Pole wechselseitig erregt, d. h. die Er-

Digitized by Google

regung von $N_{II} S_I$ vom Zweige 01 (Fig. 483) abnimmt und die von $N_I S_{II}$ vom Zweige 02. Hierdurch wird auch ein Umpolarisieren der Maschine vermieden, das, wenn jeder Zweig sein eigenes Magnetpaar erregt, infolge der Ankerrückwirkung bei den Polen N_I und S_{II} leicht eintreten kann. Diese beiden Pole werden nämlich dann immer von dem Zweige 02, bei welchem die Ankerrückwirkung eine Umpolarisierung nicht herbeiführen kann, in richtigem Sinne magnetisiert.

Den ungleichen Einfluß der Ankerrückwirkung auf die beiden Abteilungen kann man auch dadurch kompensieren, daß man die Maschine mit dem Außenleiterstrom kompoundiert und diesen so um die Magnetschenkel führt, daß die Pole $N_{II} S_I$ geschwächt und die Pole $N_I S_{II}$ verstärkt werden.

Digitized by Google

Einunddreißigstes Kapitel.

134. Weitere Beispiele ausgeführter Maschinen.

Die nachfolgenden Beispiele stellen Maschinen dar, die auch in der ersten Auflage dieses Buches enthalten sind. Obwohl diese Modelle entweder in der gegebenen Bauart oder mit den gegebenen Abmessungen von den angeführten Firmen nicht mehr als normale Typen gebaut werden, sind sie doch in konstruktiver Hinsicht sehr lehrreich. Die früheren Firmanamen Lahmeyer & Co. und Sté. Electricité et Hydraulique, Charleroi, wurden beibehalten, ebenso der Name der nicht mehr bestehenden Firma Union E.-G., Berlin.

1. **A.-G. Volta, Reval. Generator, 4 KW, 1300 Umdr. pro Min.** 120 Volt, 33 Amp. (Fig. 484 u. 485.)

Eine sehr gefällige Form der Maschine wird durch eine kreisförmige Gestalt des Joches erreicht, und ohne daß die magnetische Streuung von den Polschuhen zum Joche hin groß wird, kann der Polschuh und der Polbogen groß gemacht werden, was eine kleinere Bürstenverstellung und Ankerrückwirkung zur Folge hat. Der Verfasser hat diese Form schon im Jahre 1886 für gußeiserne zweipolige Typen ausgeführt.

In den Fig. 484 u. 485 ist eine Maschine der A.-G. Volta in Reval von 4 KW Leistung bei 1300 Umdrehungen dargestellt; Joch und Polkerne sind in einem Stück aus Stahl, die Polschuhe aus Blech und die Lagerschilder aus Gußeisen hergestellt.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:			Wicklung:	
Durchmesser	$D = 19$	cm	Reihenschaltung	$a = 1$
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 16$	„	Leiterzahl	$N = 288$
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 16$	„	Leiterabmessungen	$\varphi = 2{,}7/3{,}1$ mm
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 5{,}8$	„	Nutenzahl	$Z = 24$
			Nutenabmessungen	$= 10{,}5 \times 17{,}5$ mm

Digitized by Google

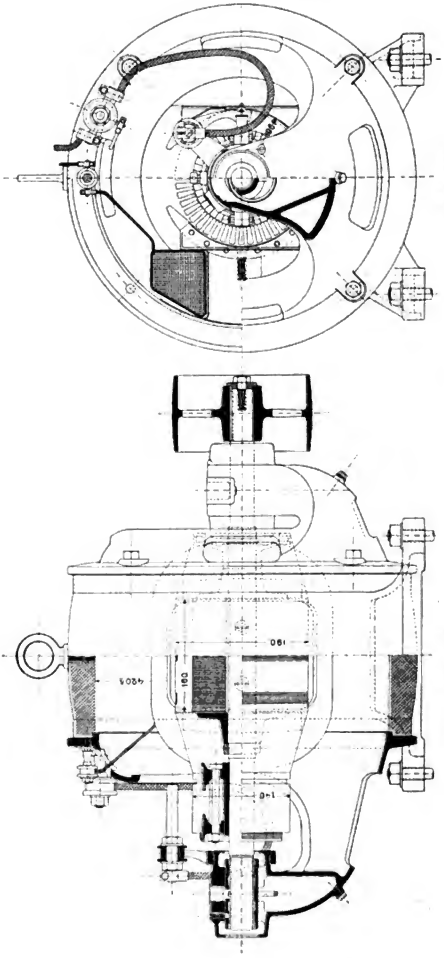


Fig. 485.

Fig. 484.

Fig. 484 und 485. A.-G. Volta, Reval. Generator, 4 KW, 1300 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 14$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 7$ „
Lamellenzahl	$K = 48$
Anzahl der Bürstenstifte	2

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 2$
Polbogen	$b_p = 20{,}5$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 16$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 150$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 83$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 900
Drahtdurchmesser
$\phi = 1{,}2/1{,}5$ mm

Versuchsergebnisse:

Ankerwiderstand (kalt) = 0,0856 Ω
Widerstand der Erregerwicklung:
kalt = 45,4 „
warm = 58,5 „

Temperaturerhöhungen (mit Thermometer ermittelt):

Anker	= 44°
Kommutator	= 44°
Erregerwicklung	= 38°

2. A.-G. Volta, Reval. Motor, 2 PS, 900 Umdr. pro Min. 220 Volt, 8,5 Amp. (Fig. 486 u. 487.)

Diese runde vierpolige Type mit Lagerschildern zeichnet sich durch ein sehr gefälliges Aussehen aus. Gehäuse und Pole sind aus Stahlguß in einem Stück gegossen. Die lamellierten Polschuhe sind an den Spitzen stark abgeschrägt. Die Ankerbleche werden durch zwei symmetrische Preßplatten und einen Schrumpfring zusammengehalten, welcher in einer flachen Eindrehung der Welle festsitzt. Die Wicklung liegt ziemlich tief in den Nuten, und die Bandagen ruhen vollständig in Eindrehungen des Ankers, wodurch die Anwendung eines kleinen Luftraums ermöglicht wird.

Der Motor wurde bei seiner Untersuchung einer sechsstündigen Dauerprobe unterworfen, und es ergaben sich nach Berichten der Firma dabei folgende mit dem Thermometer gemessene Temperaturerhöhungen:

Anker	33°.
Kommutator	26°.
Erregerwicklung	27°.

Aus der Widerstandszunahme wurde die Temperaturerhöhung der Erregerwicklung zu 41° gefunden.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 18$ cm	Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 9$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 9$ „	Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 5$ „

Digitized by Google

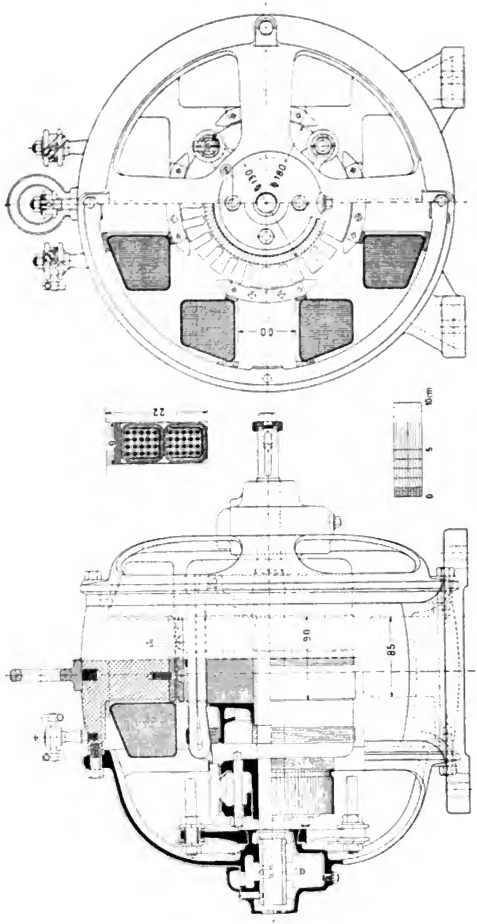


Fig. 487.

Fig. 486.

Fig. 486 und 487. A.-G. Volta, Reval. Motor, 2 PS, 900 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Wicklung:

Reihenschaltung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 950$
Leiterabmessungen	$\phi = 1{,}2$ mm
Nutenzahl	$Z = 24$
Nutenabmessungen	9×22 mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 13$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 4$ „
Lamellenzahl	$K = 95$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	4
Bürsten pro Stift	1
Bürstenabmessungen	$0{,}9 \times 1{,}6$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_p = 11$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 9$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 51$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 30$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	$= 2300$
Drahtdurchmesser	$\phi = 0{,}8$ mm.

3. **Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 23 KW, 950 Umdr. pro Min.** 450 Volt, 50 Amp. (Fig. 488 u. 489.)

Diese Maschine stellt eine Type mit Lagerschildern von sehr gefälliger Form dar. Die Polschuhe bestehen aus Eisenblech, die Polkerne aus Schmiedeisen (Rundeisen) und das Joch aus Stahlguß. — Der Anker ist ventiliert; seine vordere Endplatte wird durch einen Ring mit Bajonettverschluß festgehalten.

Die Ankerbüchse ist am äußeren Rande mit Taschen versehen, welche zum Ausbalancieren nach Bedarf mit Blei ausgegossen werden. An den Polspitzen ist die Hälfte der Bleche abgeschnitten.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 35{,}1$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 21$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 20$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 6{,}6$ „

Wicklung:

Reihenschaltung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 588$
Leiterabmessungen	$\phi = 2{,}8$ mm
Nutenzahl	$Z = 37$
Nutenabmessungen	$= 16{,}5 \times 19$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 28$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 4{,}6$ „
Lamellenzahl	$K = 147$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	4
Bürsten pro Stift	2
Bürstenabmessungen	$1{,}5 \times 2$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_p = 21{,}6$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 21$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 214$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 154$ „

Digitized by Google

Fig. 488. Fig. 489.

Fig. 488 und 489. Gesellschaft für Elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. Generator, 23 KW, 950 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Magnetwicklung:
Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 3800
Drahtdurchmesser $\phi = 1{,}2$ mm.

Temperaturerhöhungen (mit dem Thermometer gemessen):
Anker = 40°
Kommutator = 24°
Magnetwicklung = 33°

4. **Maschinenfabrik Oerlikon. Hauptschlußgenerator, 132 KW, 475 Umdr. pro Min.** 2000 Volt, 66 Amp. (Fig. 490 u. 491).

Die Maschinenfabrik Oerlikon baute diese Maschinengattung in 7 Normalgrößen von 22 bis 150 KW als Serienmaschinen für Hochspannungskraftübertragungen und verwendete dabei normal die Spannungen von 1000, 1500 und 2000 Volt. Die Haupteigenschaften und Vorteile dieses Übertragungssystems sind in Abschnitt 111, S. 502, erläutert.

Die magnetische Anordnung der Maschine entspricht der sogen. Manchestertype. Diese früher vielfach ausgeführte Bauart ist heute,

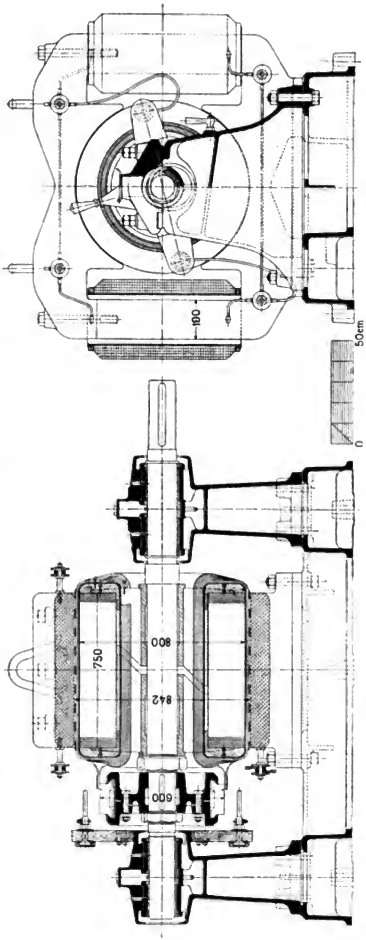


Fig. 491.

Fig. 490.

Fig. 490 und 491. Maschinenfabrik Oerlikon. Hauptschlußgenerator, 132 KW, 475 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

abgesehen von dem vorliegenden speziellen Falle, wohl vollständig verlassen, da sie eine sehr große Streuung ergibt und auch in bezug auf das Gewicht der Maschinen ungünstig ist. Der glatte Anker ist mit Ringwicklung versehen, welche bei Hochspannungsmaschinen den Vorteil bietet, daß die Spannung zwischen benachbarten Wicklungselementen nur gleich der in einer Spule induzierten EMK wird.

Das Joch besteht aus Stahlguß und ist auf die gußeiserne Grundplatte aufgeschraubt. Die beiden Magnetspulen sind unter sich parallel geschaltet. Die Führung der Verbindungsleitungen und Anschlüsse auf beiden Seiten des Jochs ist in der Figur deutlich sichtbar.

Bemerkenswert ist noch die Konstruktion der Bürstenbrille. Auf das Lager ist ein zweiteiliger, schmiedeiserner Führungsring aufgesetzt, an welchen zwei Scheiben aus in Öl gekochtem Holz angeschraubt sind, die die Bürstenstifte tragen. Auch auf beiden Seiten des Ankers sind ölgetränkte Holzringe angebracht.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:		Magnetgestell:	
Durchmesser	$D = 80$ cm	Polzahl	$2p = 2$
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 75$ „	Polbogen	$b_p = 97$ cm
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 75$ „	Polschuhlänge	$l_p = 75$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 17{,}5$ „	Kernquerschnitt	$Q_m = 1430$ cm²
Wicklung:		**Magnetwicklung:**	
Reihenschaltung	$a = 1$	Schaltung der Spulen: parallel	
Leiterzahl	$N = 840$	Windungen pro Spule = 704	
Leiterabmessungen	$\phi = 5{,}2$ mm	Drahtdurchmesser	$\phi = 7{,}0$ mm
Nutenzahl	$Z = 210$		
Kommutator:		**Temperaturerhöhungen (mit Thermometer gemessen):**	
Durchmesser	$D_k = 60$ cm	Anker	$= 37^0$
Nutzbare Länge	$L_k = 12$ „	Kommutator	$= 28^0$
Lamellenzahl	$K = 210$	Magnetwicklung	$= 38^0$

5. **Maschinenfabrik Oerlikon. Kapselmotor, 3 PS, 1400 Umdr. pro Min.** 105 Volt, 27 Amp. (Fig. 492 u. 493.)

Der Motor ist vollständig geschlossen, auch die Lager sind möglichst nach innen verlegt. Die obere Lageröffnung ist mit eingekapselt und erst nach Abheben der Deckelklappen zugänglich, um das Eindringen von Staub in die Lager möglichst zu verhindern. Die auf das Stahlgehäuse aufgeschraubten Blechpole sind in der Mitte mit radialen Schlitzen versehen, um die Quermagnetisierung

Digitized by Google

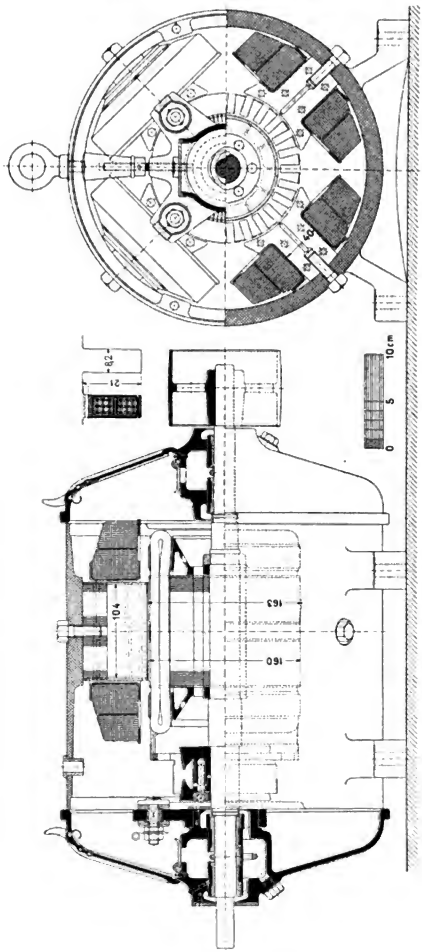


Fig. 492. Fig. 493.

Fig. 492 und 493. Maschinenfabrik Oerlikon. Kapselmotor, 3 PS, 1400 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

zu verringern. An den Polspitzen ist die Hälfte der Bleche abgeschnitten. Durch die Verwendung der lamellierten Pole ist es ermöglicht, dem Anker trotz des geringen Luftraums von 1,5 mm eine ziemlich grobe Teilung zu geben. Die Ankerbleche werden durch einen Schrumpfring, der in einer flachen Eindrehung der Welle festsitzt, zusammengehalten; sechs axiale Luftöffnungen dienen zur Abkühlung der Bleche und verbessern die Luftzirkulation im Innern des Motors. Auch bei Herstellung der Magnetspulen ist für möglichst gute Abkühlung Sorge getragen, um eine intensive Materialausnutzung erreichen zu können. Sie sind in zwei Abteilungen gewickelt, welche durch zwischengelegte Preßspannstreifen getrennt sind, ähnlich wie die auf S. 125 beschriebene Magnetspule Fig. 222, und die obere Stirnfläche ist möglichst unbedeckt gelassen. Die Bürstenstifte sind, um Verdrehung zu vermeiden, an der Einsatzstelle vierkantig ausgeführt, und die Zuleitungen sind ohne Zwischenschaltung von besonderen Klemmen an sie angeschlossen. Die Riemenscheibe kann auf beiden Seiten der Maschine aufgesetzt werden.

Der Motor hat bei der vollen Belastung von 3 PS einen Wirkungsgrad von 78%, bei Halblast von 70%. Das Gesamtgewicht der Maschine beträgt 115 kg. Bei einstündigem Betrieb ergibt sich eine Temperaturerhöhung von 45°; bei dreistündigem, ununterbrochenem Betrieb kann der Motor bei gleicher Temperaturerhöhung nur die halbe Leistung von 1,5 PS abgeben.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 16$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 11{,}4$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 11{,}4$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 3{,}1$ „

Wicklung:

Reihenschaltung	$a = 1$
Leiterzahl	$N = 450$
Leiterabmessungen	$\phi = 1{,}8/2{,}2$ mm
Nutenzahl	$Z = 25$
Nutenabmessungen	$= 8{,}2 \times 21$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 11{,}6$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 3$ „
Lamellenzahl	$K = 75$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	2
Bürsten pro Stift	1
Bürstenabmessungen	$1 \times 2{,}5$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 4$
Polbogen	$b_p = 8{,}6$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 11$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 36$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 20$ „

Digitized by Google

Magnetwicklung:	Temperaturerhöhungen (mit Thermometer gemessen):
Schaltung der Spulen: Serie	
Windungen pro Spule = 1420	Anker = 45°
Drahtdurchmesser = ϕ 1,0/1,3 mm	Kommutator = 40°
	Magnetwicklung = 40°

6. Union E.-G., Berlin. Kapselmotor, 8 PS, 400 Umdr. pro Min. 220 Volt, 33 Amp. (Fig. 494 u. 495.)

Der in Fig. 494 u. 495 abgebildete Motor war hauptsächlich zum Antrieb von Kranen bestimmt, wodurch auch die im Verhältnis zur Leistung niedere Tourenzahl bedingt ist. Er ist mit Kugellagern ausgerüstet. Die Pole sind an das Polgehäuse angegossen. Die seitliche Schlußplatte der lamellierten Polschuhe ist mit einem Vorsprunge versehen, auf welchem die Magnetspulen aufsitzen. Der Bürstenträger ist zwischen dem Gehäuse und dem Lagerschild eingesetzt. Die Klemmen für die Stromzuführung sind in einem besonderen verschlossenen Kasten, der seitlich am Gehäuse befestigt ist, untergebracht und so vor Staub und Feuchtigkeit geschützt, was namentlich bei Kranmotoren, welche im Freien oder in Gießereien arbeiten sollen, notwendig ist. Auf der Kommutatorseite sind an dem Deckel zwei abnehmbare Platten angeordnet, um den Kommutator und die Bürsten zugänglich zu machen.

Der dargestellte Motor wurde als Hauptschlußmotor für Spannungen von 110, 220 und 500 Volt ausgeführt. Nutenzahl, Nutenform und Lamellenzahl sind für alle drei Ausführungen gleich. Ferner ist die Drahtzahl und -stärke für 110 und 220 Volt gleich. Die Ankerwicklung der 220 Volt-Maschine ist mit Reihenschaltung, also zwei Ankerstromzweigen ausgeführt; sämtliche Hauptschlußspulen sind hintereinander geschaltet. Bei 110 Volt erhält der Anker Parallelschaltung, also vier Ankerstromzweige und pro Stromzweig die halbe Drahtzahl, so daß die notwendigen Erreger-Amperewindungen für beide Spannungen gleich werden. Es können daher die gleichen Erregerspulen verwendet werden, nur werden hier je zwei Hauptschlußspulen parallel geschaltet. Für die Spannung von 500 Volt wird die Drahtzahl verdoppelt und die Erregung etwas erhöht.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:		Wicklung:	
Durchmesser	$D = 30{,}6$ cm	Reihenschaltung	$a = 1$
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 12{,}5$ „	Leiterzahl	$N = 810$
		Leiterabmessungen	$= 1{,}7 \times 2{,}5$ mm
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 11{,}9$ „	Nutenzahl	$Z = 45$
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 6{,}4$ „	Nutenabmessungen	$= 9 \times 26$ mm

Digitized by Google

Fig. 494.

Fig. 495.

Fig. 494 und 495. Union E.-G., Berlin. Kapselmotor, 8 PS, 400 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Kommutator:		Magnetwicklung:	
Durchmesser	$D_k = 24$ cm	Schaltung der Spulen: Serie	
Nutzbare Länge	$L_k = 8$ „	Windungen pro Spule	$= 97$
Lamellenzahl	$K = 135$	Drahtdurchmesser	$\phi = 4{,}2$ mm
Magnetgestell:		Temperaturerhöhungen	
Polzahl	$2p = 4$	(nach zweistündigem Lauf):	
Polbogen	$b_p = 18{,}2$ cm	Anker	$= 51°$
Polschuhlänge	$l_p = 12{,}5$ „	Kommutator	$= 52°$
Kernquerschnitt	$Q_m = 145$ cm^2	Magnetwicklung	$= 70°$
Jochquerschnitt	$Q_j = 75$ „		

7. Siemens & Halske, A.-G., Berlin. Kapselmotor, 12 PS, 635 Umdr. pro Min. 500 Volt, 20 Amp. (Fig. 496 u. 497.)

Bei der Konstruktion dieser Motoren wurde nach den Mitteilungen der Firma in erster Linie auf möglichst gedrungenen Bau Rücksicht genommen, da der Platz zur Unterbringung der Motoren vielfach sehr beschränkt ist. Vor allem sind die Motoren schmal gebaut, damit die Vorgelegewelle der Motorachse möglichst nahe liegt und demgemäß die Räder des ersten Vorgeleges möglichst klein ausfallen. Dies ist durch Anwendung von Folgepolen erreicht, was jedoch ungünstige Kommutationsverhältnisse ergibt. Der Kommutator und die Bürsten sind durch Klappen zugänglich. Das Gehäuse ist horizontal geteilt; die obere Hälfte kann nach Lösung einiger Schrauben abgehoben werden, wodurch der Anker freigelegt wird. Die Lager sind mit Ringschmierung versehen. Damit trotzdem die Motoren auch in umgekehrter Lage (mit den Füßen nach oben) oder auch an senkrechter Wand angeordnet werden können, was in manchen Fällen erwünscht sein kann, sind besondere Lagerschilder vorgesehen, die am Polgehäuse mit 4 Schrauben befestigt sind und daher stets so angeschraubt werden können, daß das Ölgefäß die richtige Lage erhält. An die Seiten des Polgehäuses sind Arbeitsleisten angegossen, die es ermöglichen, entweder den Motor an eine Wand anzuschrauben oder ein Vorgelegelager mit ihm zu verbinden oder ihn pendelnd aufzuhängen. — Die Bleche des Motorankers sind nicht unmittelbar auf die Achse, sondern auf eine besondere Buchse gesteckt, was den Vorteil bietet, daß die Achse leicht auswechselbar ist. Die Ausführung von Motoren mit anormalen Wellenenden (größere Länge, Anbringung eines Gewindezapfens und dergl., Verlängerung auf der Kommutatorseite) bereitet also in der Fabrikation keine Schwierigkeiten.

Digitized by Google

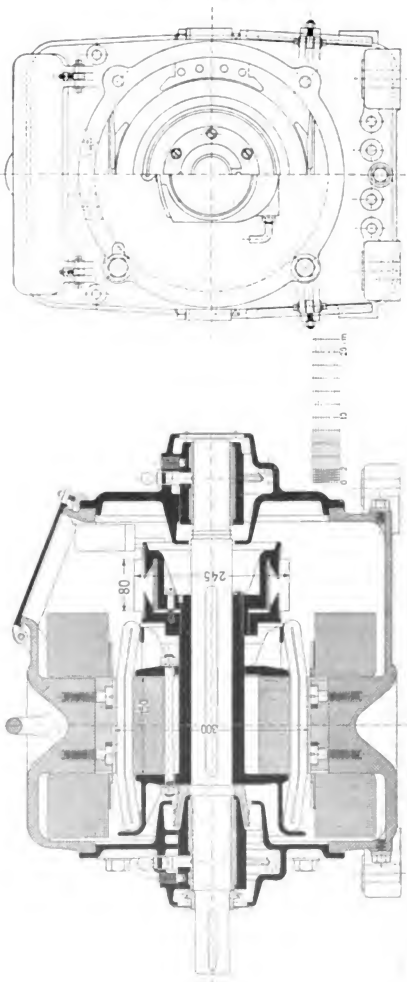


Fig. 496. Fig. 497.

Fig. 496 und 497. Siemens & Halske A.-G., Berlin. Kapselmotor, 12 PS, 635 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine.

Anker:		Kommutator:	
Durchmesser	$D = 30$ cm	Durchmesser	$D_k = 24{,}5$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 15$ „	Nutzbare Länge	$L_k = 8$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 15$ „	Lamellenzahl	$K = 123$
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 4{,}8$ „	**Magnetgestell:**	
Wicklung:		Polzahl	$2p = 4$
Reihenschaltung	$a = 1$	Polbogen	$b_p = 16{,}5$ cm
Leiterzahl	$N = 984$	Polschuhlänge	$l_p = 14{,}6$ „
Leiterabmessungen	$\phi = 2{,}03$ mm	Kernquerschnitt	$Q_m = 165$ cm²
Nutenzahl	$Z = 41$	**Magnetwicklung:**	
Nutenabmessungen	$= 11{,}9 \times 27$ mm	Schaltung der Spulen: Serie	
		Windungen pro Spule	$= 357$
		Drahtdurchmesser	$\phi = 3{,}1$ mm

8. **Maschinenfabrik Oerlikon. Generator mit vertikaler Welle, 100 KW, 150 Umdr. pro Min.** 115 Volt, 870 Amp. (Fig. 498 u. 499.)

Der Generator wird durch eine Turbine angetrieben und das Gewicht des Ankers ruht auf der Turbinenwelle. Das untere Lager ist zweiteilig und der äußere Durchmesser der Lagerhülse ist so groß, daß der Wellenflansch durch die Bohrung des Armkreuzes hindurchgeht. Die Schmierung erfolgt von oben durch eine Bohrung der Welle. Unter jedem Lager sind für das abtropfende Öl Fangschalen angebracht.

Die obere Stirnfläche ist mit einer Verkleidung aus Segeltuch versehen, damit der von den Bürsten und dem Kommutator abfallende Staub nicht in den Anker eindringen kann. Die Nachrechnung ergibt, daß der Generator sehr reichlich dimensioniert ist.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:			
Durchmesser	$D = 115$ cm	Leiterzahl	$N = 360$
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 44$ „	Leiterabmessungen	$2{,}7 \times 22$ mm
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 44$ „	Nutenzahl	$Z = 180$
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 14{,}9$ „	Nutenabmessungen	$= 9 \times 26$ mm
Wicklung:		**Kommutator:**	
Reihenparallelschaltung	$a = 3$	Durchmesser	$D_k = 53$ cm
		Nutzbare Länge	$L_k = 17$ „
		Lamellenzahl	$K = 180$

Digitized by Google

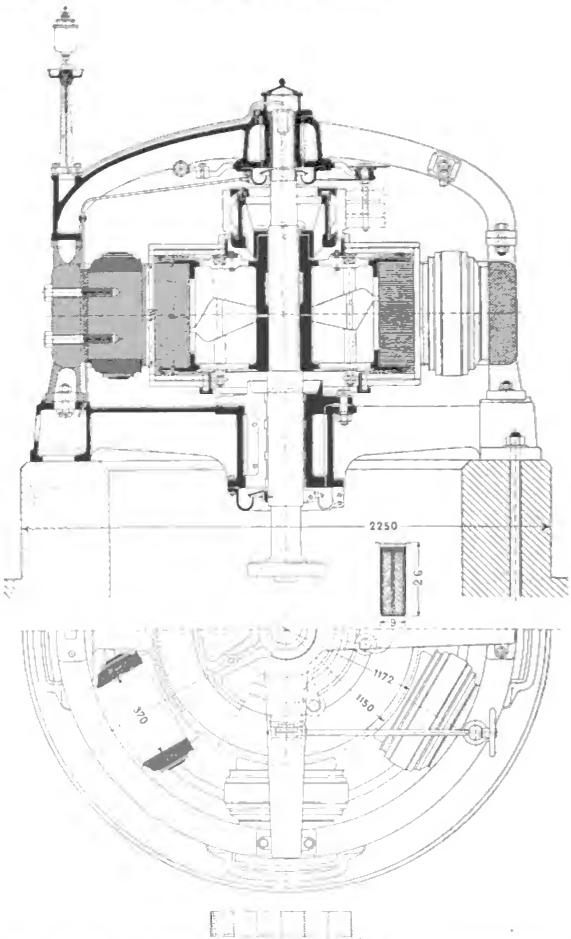


Fig. 498 und 499. Maschinenfabrik Oerlikon. Generator mit vertikaler Welle, 100 KW, 150 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$
Polbogen	$b_p = 43$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 47$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 1075$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 528$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	= 450
Drahtdurchmesser	$\phi = 5{,}0$ mm

9. **Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Generator, 150 KW, 500 Umdr. pro Min.** 200 Volt, 750 Amp. (Fig. 500 bis 502.)

Anker und Kommutator gestatten der Luft ein Durchstreichen von der einen Ankerseite zur anderen. Der Anker hat drei Lüftungsschlitze, deren Konstruktion aus Fig. 502 ersichtlich ist; zwischen den Zähnen liegen 2 mm starke Messingstege, und im Innern des Ankerkernes bilden dreiseitig ausgestanzte und ausgebogene rechteckige Blechstücke die erforderlichen Stützen.

Die Magnetspulen sind ohne Spulenkasten hergestellt, mit Baumwollband umwickelt und mit Schnurbändern versehen. Zwischen Joch und Spule liegt eine Filzscheibe *F*. Die Entfernung der Lager ist so groß gewählt, daß für andere Verhältnisse, z. B. große Stromstärken, auch ein längerer Kommutator und Anker Platz hat.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 75$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 23$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 20$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 11{,}4$ „

Wicklung:

Parallelschaltung	$a = 3$
Leiterzahl	$N = 456$
Leiterabmessungen	$= 2{,}4 \times 12$ mm
Nutenzahl	$Z = 114$
Nutenabmessungen	$= 8{,}5 \times 36$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 52$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 26{,}5$ „
Lamellenzahl	$K = 228$

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 6$
Polbögen	$b_p = 28$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 25$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 453$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 216$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen:	Serie
Windungen pro Spule	= 868
Drahtdurchmesser	$\phi = 2{,}6$ mm

Temperaturerhöhungen:

Anker	$= 45^0$
Kommutator	$= 50^0$
Magnetwicklung	$= 40^0$

10. **Sté. Electricité et Hydraulique, Charleroi. Bahngenerator, 500 KW, 100 Umdr. pro Min.** 500 Volt, 1000 Amp. (Taf. VIII.)

Der Generator ist entsprechend den hohen Anforderungen, welche der Bahnbetrieb mit seinen starken und raschen Belastungs-

Digitized by Google

Fig. 502.

Fig. 500.

Fig. 501.

Fig. 500 bis 502. Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Co. Generator, 150 KW, 500 Umdr. pro Min.

Digitized by Google

schwankungen an die Maschinen stellt, sehr kräftig und gedrungen gebaut. Der Ankerkörper ist mit dem Schwungrad fest verschraubt und dadurch gewissermaßen mit diesem zu einem Stücke vereinigt, so daß die aus den Belastungsschwankungen resultierenden Stöße direkt vom Schwungrad aufgenommen werden, ohne die Welle und die übrigen Maschinenteile zu beanspruchen.

Der Ankerkörper ist auf eine sogenannte falsche Nabe aufgesetzt; diese ist zweiteilig und wurde angeordnet, um den einteiligen Ankerkörper über die Kurbel der Dampfmaschinenwelle bringen zu können. Das Joch besteht aus Gußeisen und zeigt einen massiven, einfach zu formenden Querschnitt. Pole und Polschuhe bilden ein Stück: die Polschuhe sind in axialer Richtung steil abgeschnitten. Die Ankerwicklung ist als vierfach geschlossene Reihenparallelschaltung mit Äquipotentialverbindungen ausgeführt, welche hinter dem Anker in Form von Gabeln angeordnet sind. Der Bürstenträger ist, wie dies bei größeren Maschinen vielfach geschieht, durch vier Konsole an dem Joch befestigt.

Rechts neben der Maschine ist noch die zugehörige Schaltsäule U sichtbar, auf welcher der Unterbrecher der Ausgleichleitung (siehe Abschn. 96) und ein Umschalter angebracht ist, mit dem man die Maschine entweder als Doppelschlußmaschine oder als Nebenschlußmaschine schalten kann. Das Schema dieser Schaltvorrichtung ist in Fig. 3 Tafel VIII aufgezeichnet. Der einfache Schalter stellt den Unterbrecher der Ausgleichleitung, der doppelarmige den Umschalter dar, mit welchem die Hauptschlußwicklung kurzgeschlossen werden kann.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 220$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 45$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 41$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 21{,}8$ „

Wicklung:

Reihenparallelschaltung	$a = 4$
Leiterzahl	$N = 1352$
Leiterabmessungen	$= 3{,}1 \times 14{,}5$ mm
Nutenzahl	$Z = 338$
Nutenabmessungen	$= 10{,}5 \times 42$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 170$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 20$ „
Lamellenzahl	$K = 676$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	12
Bürsten pro Stift	4
Bürstenabmessungen	$= 1{,}5 \times 4$ cm

Digitized by Google

Magnetgestell:		Magnetwicklung:
Polzahl	$2p = 12$	Schaltung der Spulen: Serie
Polbogen	$b_p = 43$ cm	Windungen pro Spule $= 5^1/_2$
Polschuhlänge	$l_p = 43$ „	Drahtabmessungen
Kernquerschnitt	$Q_m = 1320$ cm²	$= 2 \times (4 \times 90)$ mm
Jochquerschnitt	$Q_j = 1480$ „	

11. E.-A.-G. vorm. Kolben & Co., Prag. Bahngenerator, 500 KW, 90 Umdr. pro Min. 500 bis 550 Volt, 1000 Amp. (Tafel IX.)

Auch dieser Bahngenerator zeigt eine starke und gedrungene Bauart. Das Stahlgehäuse ist mittels Druckschrauben auf zwei gußeiserne Grundplatten aufgesetzt und durch Schrauben in allen drei Dimensionen verstellbar, so daß es leicht genau zentrisch eingestellt werden kann.

Bei der Konstruktion von Anker und Kommutator, sowie bei der Anordnung der Wicklung ist für möglichst freien Luftzutritt und gute Kühlung Sorge getragen. Die Wicklung (Schleifenwicklung) ist mit Äquipotentialverbindungen versehen, welche hinter dem Ankor als Ringe angeordnet sind. Eine Abbildung des Ankers der Maschine, auf welcher die Ausgleichsringe deutlich sichtbar sind, gibt Fig. 200.

Der Bürstenträger ist an einem großen Ring befestigt, der in das Joch eingesetzt und in diesem frei drehbar ist.

Auf der Tafel ist auch noch die Leerlaufcharakteristik der Maschine (Fig. 3) und eine Verlustkurve gegeben (Fig. 4), welche die Verluste in Watt als Funktion der Klemmenspannung für die vollbelastete Maschine zeigt.

Bei 500 Volt, 1000 Amp. und einer Nebenschlußerregung von 4,7 Amp. (Hauptschlußwicklung ausgeschaltet) verteilen sich die Verluste wie folgt:

Ankerkupfer . . .	15 000 Watt	$= 2{,}8$ %
Feldkupfer	2 600 „	$= 0{,}48$ „
Nebenschl.-Regulator	250 „	$= 0{,}05$ „
Hysteresis	10 000 „	$= 1{,}9$ „
Bürstenübergang . .	5 000 „	$= 0{,}93$ „
Bürstenreibung . .	2 550 „	$= 0{,}48$ „
	35 400 Watt	$= 6{,}64$ %.

Der Wirkungsgrad für Vollast beträgt demnach 93,4 %.

Als Widerstände des Generators wurden bei 15° gefunden:

Ankerwiderstand	0,013	Ohm
Nebenschlußwicklung . . .	70,9	„
Hauptschlußwicklung . . .	0,00455	„
Bürstenübergang bei Stillstand	0,006	„

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 244$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 47$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 39{,}8$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 27$ „

Wicklung:

Parallelschaltung	$a = 5$
Leiterzahl	$N = 1800$
Leiterabmessungen	$= 2 \times 20$ mm
Nutenzahl	$Z = 300$
Nutenabmessungen	$= 13{,}5 \times 50$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 220$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 19$ „
Lamellenzahl	$K = 900$

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 10$
Polbogen	$b_p = 59$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 47$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 1590$ cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 880$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule = 1500
Drahtabmessungen
$= 2 \times (2{,}2 \times 150)$ mm

Temperaturerhöhungen:

Anker	$= 30°$
Kommutator	$= 35°$
Magnetwicklung	$= 28°$

12. E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Nebenschlußgenerator, 1000 KW, 94 Umdr. pro Min. 240 Volt, 4200 Amp. (Tafel X.)

Die E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co. hat eine ganze Reihe großer Maschinen ausgeführt und zuerst große Schwungradmaschinen gebaut. Die letzteren erhalten große Ankerdurchmesser und geringe Ankerlänge. Die großen Durchmesser haben dazu geführt, daß die Firma eine besondere Jochkonstruktion ausgebildet hat, welche sich an die entsprechenden Formen für große Drehstromgeneratoren anschließt. Die Form dieser Gußgehäuse ist aus den Tafeln X und XI zu ersehen. Sie sind innen abgedreht, und die Pole aus Stahlguß sind auf die Drehfläche mit einer von außen hineinragenden Schraube aufgeschraubt; der Kopf dieser Schraube ist in die Höhlung des Gehäuses verlegt, was das gute Aussehen der Maschine erhöht. Um die Übergangsfläche zwischen den Stahlpolen und dem Gußjoch zu vergrößern, sind zwischen diesen Bleche eingeschoben, in welchen sich der Kraftfluß, ehe er in das Gußjoch übertritt, ausbreitet. Die Maschinen sind sämtlich mit Reihenparallelschaltung und Äquipotentialverbindungen ausgeführt, welche in Form von Drahtgabeln hinter dem Kommutator angeordnet und auf der Kommutatorbüchse durch Bandagen festgehalten sind.

Digitized by Google

Der in Tafel X aufgezeichnete 1000 KW-Generator ist in drei Ausführungen im Elektrizitätswerk Gersthofen bei Augsburg zur Aufstellung gelangt. Die Maschinen sind unmittelbar mit Turbinen gekuppelt. Die Nabe des doppelarmig ausgebildeten Ankerkörpers ist gesprengt und mit Schrumpfringen zusammengehalten. Die Kommutatorbüchse ist an Arbeitsflächen des Armsystems angeschraubt. Die Ankerpreßplatten tragen an der Innenseite eine große Anzahl radialer Rippen, so daß zwischen ihnen und den Ankerblechen Zwischenräume entstehen, durch welche die Luft frei durchstreichen kann. Die Wicklung wird unter den Polen durch Holzkeile und außerhalb durch die in Fig. 180 dargestellten Stahlbandagen festgehalten.

Fig. 3 zeigt die Konstruktion des Bürstenträgers in größerem Maßstabe. Zur Zentrierung des drehbaren Ringes besitzt jede Konsole zwei Stellschrauben V, die auf ein radial bewegliches Führungsstück F gepreßt werden. S_1 und S_2 sind die Sammelringe; der eine wird an alle positiven, der andere an alle negativen Bürstenstifte angeschlossen. Von denselben wird, wie in den Fig. 1, 2 und 4 dargestellt ist, der Strom abgeleitet.

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 380$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 30$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 27$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 26$ „

Wicklung:

Reihenparallelschaltung	$a = 12$
Leiterzahl	$N = 1632$
Leiterabmessungen	$= 4 \times 15$ mm
Nutenzahl	$Z = 816$
Nutenabmessungen	$= 6{,}2 \times 38$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 290$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 30$ „
Lamellenzahl	$K = 816$

Bürsten:

Material	Kohle
Anzahl der Stifte	24
Bürsten pro Stift	8
Bürstenabmessungen	$= 2 \times 3$ cm

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 24$
Polbogen	$b_p = 38$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 30$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 660$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 836$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen: Serie
Windungen pro Spule $= 308$
Drahtdurchmesser $\phi = 6{,}6$ mm

Temperaturerhöhungen:

Anker	$= 20°$
Kommutator	$= 27°$
Magnetwicklung	$= 19°$ im. Th.

Digitized by Google

13. **E.-A.-G. vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Doppelgenerator, 1400 KW, 110 Umdr. pro Min.**[1]) I. Lichtdynamo (links). 700 KW, 250 bis 290 Volt, 2800 bis 2420 Amp. II. Bahndynamo (rechts). 700 KW, 600 bis 660 Volt, 1170 bis 1060 Amp. (Tafel XI.)

Die auf Tafel XI dargestellte Maschine zeigt die Vereinigung zweier Generatoren, von denen der eine zur Speisung eines Lichtnetzes, der andere zur Stromerzeugung für Bahnbetrieb dient. Sie werden durch eine stehende Dreifachexpansionsmaschine angetrieben, die bei 110 Umdrehungen 1200 PS leistet. Die Generatoren leisten jeder normal bei Dauerbetrieb 700 KW, während drei Stunden 830 KW und während $^1/_2$ Stunde 1000 KW.

Die beiden Anker, die gleichzeitig als Schwungrad dienen, sitzen auf einem einteiligen gußeisernen Ankerträger, dessen Nabe an drei Stellen gesprengt und durch zwei Schrumpfringe und einen Keil auf der Welle gehalten ist. Beide Anker haben gleichen Durchmesser und sind vollständig unabhängig vom Ankerträger so ausgebildet, daß sie vollkommen fertig mit Wicklung und Kommutator zum Versand gebracht und an Ort und Stelle an den Ankerträger angeschraubt werden konnten. Der Ankerdurchmesser ist so gewählt, daß das geforderte Schwunggewicht $GD^2 = 30000$ durch die rein konstruktiven Querschnitte erreicht wurde und eine weitere Schwungmasse nicht mehr untergebracht zu werden brauchte. Die Kommutatorbüchse und die Ankerpreßringe enthalten keinerlei Aussparungen, so daß die ganze angesaugte Luft über den Kommutator hinwegstreicht und durch die in den Ankerblechen vorgesehenen Ventilationsschlitze wieder austritt, wodurch eine sehr wirksame Kühlung erreicht wird. Um Überschlagen von Funken von dem Kommutator der Bahnmaschine nach der Kommutatorbüchse zu verhindern, sind die Preßbacken auf der Stirnseite des Kommutators mit einem in Segmenten aufgeschraubten Stabilitring S verkleidet.

Die Wicklungsstäbe sind mit Isolierstoff direkt umpreßt und in die gefrästen Nuten am Ankerumfang eingelegt. In diesen werden die Spulen, wie bei der vorher beschriebenen Maschine, durch Stahlbandagen festgehalten, von welchen zwei an der Austrittsstelle der Stäbe aus den Nuten und zwei an den Wickelköpfen am Ende der Wicklungsträger angebracht sind. Wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeit der Maschine (21 m/sec) ist die Isolation des Ankerkörpers am äußeren Umfange durch Aufziehen von Schnurbandagen besonders gegen Loslösen geschützt. Die Umfangsgeschwin-

[1]) Siehe ETZ 1903, S. 231. F. Collischonn. Über Doppelmaschinen, insbesondere solche mit Schwungradanordnung.

Digitized by Google

digkeit des Kommutators mußte bedeutend kleiner gewählt werden als die des Ankers, und so ergibt sich eine große Differenz zwischen Ankerdurchmesser und Kommutatordurchmesser und eine große Länge der Verbindungen der Wicklung mit dem Kommutator. Diese sind daher zur Sicherung ihrer gegenseitigen Lage in der Mitte besonders befestigt, indem sie in einem mit Nuten versehenen Holzring eingesetzt und durch aufgeschraubte Fiberstücke in diesen festgehalten sind. (Siehe Fig. 6 d. T.) Wegen des großen Abstandes zwischen Kommutator und Gehäuse ist bei dieser Maschine auch der Bürstenträger nicht am Gehäuse angebracht, sondern bei der Bahnmaschine am Lagerfuß, bei der Lichtmaschine am Ölkasten für das Exzenter der Dampfmaschine mittelst einer Manschette angeschraubt. Zur Führung dient ein auf die Manschette aufgeschraubter Ring; die Stellvorrichtung ist auf einer besonderen Säule gelagert. Die Stromsammelschienen der Bahnmaschine sind in den gußeisernen, mit Holz ausgekleideten Bürstenträgern von $\perp$-förmigem Querschnitt isoliert und völlig verdeckt eingelegt und abwechslungsweise direkt mit den Bürstenbolzen verschraubt. Die letzteren sind an den Durchführungsstellen durch den Bürstenträger mittelst Büchsen isoliert und außerdem an den Endmuttern durch Ambroinkappen verdeckt, so daß also stromführende Teile am Bürstenträger nicht frei liegen.

Die untere Hälfte des Gehäuses ist durch eine starke Druckschraube an der tiefsten Stelle gestützt. Das linke Lager ist auf der Tafel nur schematisch angedeutet.

Die bei den Abnahmeversuchen vorgenommenen Indizierungen ergaben folgende Werte für den Gesamtwirkungsgrad der Dampfdynamo:

Lichtmaschine bei 712 KW 87,2%,
Bahnmaschine bei 736 KW 88 %.

Ferner wurden folgende Temperaturerhöhungen festgestellt:

	Belastung				Temperaturzunahme		
	Volt	Ampere	Kilowatt	Dauer Stunden	Anker	Kommutator	Magnete[1])
Lichtmaschine	246	3315	815	3	20°	35°	—
Lichtmaschine	246	2896	712	10	22,5°	27,5°	51°
Bahnmaschine	607	1211	736	$9^1/_2$	21°	15°	40°

[1]) Durch Widerstandsmessung ermittelt.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine.

Anker:	Licht-Type	Bahn-Type
Durchmesser	$D = 370$	370 cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 24{,}4$	24,4 „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 21{,}4$	21,4 „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 26{,}4$	26,4 „
Wicklung:		
Reihenparallelschaltung	$a = 10$	4
Leiterzahl	$N = 1680$	1528
Leiterabmessungen	$= 3 \times 15$	$= 3{,}5 \times 15$ mm
Nutenzahl	$Z = 840$	$= 764$
Nutenabmessungen	$= 5{,}2 \times 38$	$= 6{,}2 \times 38$ mm
Kommutator:		
Durchmesser	$D_k = 223$	225 cm
Nutzbare Länge	$L_k = 30$	15 „
Lamellenzahl	$K = 840$	764
Magnetgestell:		
Polzahl	$2p = 20$	16
Polbogen	$b_p = 42$	52,5 cm
Polschuhlänge	$l_p = 24{,}4$	24,4 „
Kernquerschnitt	$Q_m = 817$	1020 cm²
Jochquerschnitt	$Q_j = 545$	775 „
Magnetwicklung:		
Schaltung der Spulen:	Serie	Serie
Windungen pro Spule	$= 390$	$= 1100$
Drahtdurchmesser	$\varphi = 6{,}0$	4,2 mm

14. **Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin. Generator, 1320 KW, 85 Umdr. pro Min.** 114 bis 145 Volt, 9500 bis 9100 Amp. (Tafel XII.)

Der Generator, welcher für die Elektrochemische Fabrik Bitterfeld ausgeführt wurde, hat ein Magnetgehäuse aus Gußeisen. Die an die untere Gehäusehälfte angegossenen Füße ruhen auf einem einzementierten Gußrahmen auf und sind durch Zug- und Druckschrauben befestigt; die Druckschrauben (D) sitzen auf dem Gußrahmen auf, während die Zugschrauben (Z) unten in gußeiserne Zylinder eingeschraubt sind, die in Fundamentlöcher eingelassen und darin mit Zement vergossen sind. Außerdem ist das Gehäuse an der tiefsten Stelle noch durch eine Preßschraube unterstützt. Zur seitlichen Einstellung sind ebenfalls Schrauben vorgesehen, und die richtige Stellung ist durch Paßschrauben (P) bezeichnet.

Digitized by Google

Die Magnetpole sind aus Blechen zusammengesetzt und am oberen Ende gegen das Gußgehäuse zu verbreitert, um ein Ausbreiten der Kraftlinien herbeizuführen und dadurch eine zu hohe Induktion im Gußeisen an der Übertrittsstelle zu vermeiden. Auf die Blechpole sind schmiedeiserne Polschuhe aufgeschraubt. Die Magnetspulen werden durch Gußplatten getragen, die mit Preßspan beklebt sind.

Der Ankerstern der Maschine besteht aus einer kräftigen viermal gesprengten Nabe und einem doppelten Armsystem. Die vorderen Arme sind nach vorn ausgebaucht und tragen die Kommutatorbüchse. Die Wicklung ist als zweifach geschlossene Reihenparallelschaltung mit 36 Ankerstromzweigen ausgeführt. Bei ihrer Anordnung ist auf gute Luftkühlung Rücksicht genommen. Die Ankerleiter, welche einzeln mit Mika isoliert und in die unisolierten Nuten eingelegt sind (Fig. 8), sind von außergewöhnlicher Breite; sie werden mit dem Kommutator durch Rheotanbänder verbunden, deren Form in Fig. 192 gegeben ist. Entsprechend ihrer hohen Stromstärke erhält die Maschine einen sehr großen und langen Kommutator; für dessen gute Abkühlung ist dadurch gesorgt, daß er auch auf der Innenseite vollständig frei angeordnet ist, so daß auch diese ganze Fläche als Kühlfläche wirkt. Der Strom wird durch kombinierte Kupfer-Kohlenbürsten abgenommen (Fig. 7), welche ähnlich konstruiert sind, wie die auf Seite 62 beschriebenen. Die Kohle wird hier durch eine Spiralfeder an den Kommutator angedrückt, welche durch Drehung des Stiftes S_1 eingestellt werden kann.

Der Bürstenträger ist durch lange Arme am Gehäuse befestigt. An diese ist zunächst ein feststehender Tragring (T) angeschraubt, der außerdem noch durch zwei auf Säulen montierte Druckschrauben gestützt ist, welche gleichzeitig zur genauen zentrischen Einstellung dienen. In diesen Tragring ist der Bürstenring eingesetzt und an den Stellen, wo die Arme angreifen, seitlich durch schmiedeeiserne Scheiben S gehalten. Er kann durch die Verstellvorrichtung C (Fig. 4) gedreht werden und durch die unter dem rechten oberen Arm angebrachte Keilschraube K mit Preßstück P_1 in seiner Lage festgestellt werden (Fig. 3).

Der Strom wird von den Sammelringen mittelst U-förmig ausgebogener Kupferschienen (Fig. 5) und von diesen durch S-förmige Kupferbänder B abgenommen, die aus vielen Lagen dünner Bleche zusammengesetzt sind, um die zur Bürstenverstellung notwendige Biegsamkeit dieser Ableitungen zu erreichen.

Digitized by Google

Hauptdaten der Maschine.

Anker:

Durchmesser	$D = 320$ cm
Eisenlänge mit Luftschlitzen	$l_1 = 50$ „
Eisenlänge ohne Luftschlitze	$l = 45{,}5$ „
Eisenhöhe ohne Zähne	$h = 20$ „

Wicklung:

Reihenparallelschaltung	$a = 18$
Leiterzahl	$N = 1152$
Leiterabmessungen	$= 7 \times 11$ mm
Nutenzahl	$Z = 576$
Nutenabmessungen	$= 9{,}2 \times 30$ mm

Kommutator:

Durchmesser	$D_k = 220$ cm
Nutzbare Länge	$L_k = 63$ „
Lamellenzahl	$K = 576$

Magnetgestell:

Polzahl	$2p = 18$
Polbogen	$b_p = 40$ cm
Polschuhlänge	$l_p = 47$ „
Kernquerschnitt	$Q_m = 1175$ cm^2
Jochquerschnitt	$Q_j = 1200$ „

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen:	parallel in 3 Gruppen
Windungen pro Spule	$= 660$
Drahtabmessungen	$= 5 \times 7$ mm

Temperaturerhöhungen (bei 140 Volt, 9100 Amp.):

Anker	$= 45°$
Kommutator	$= 50°$
Magnetwicklung	$= 45°$

Digitized by Google

Nachtrag.

Bemerkung zu S. 269. Wenn die EMKe e_q und e_r bekannt sind, lassen sich einige in der Theorie der Kommutation im Bd. I gegebenen Hauptgleichungen anders schreiben. Die für den Fall, daß die Bürstenbreite gleich oder kleiner ist, als eine Lamellenteilung ($b_1 \leq \beta$) gegebene Bedingung (s. S. 414, Bd. I, Gl. 116) für die EMK, welche vom Hauptfelde bei Leerlauf (gleiche Felderregung bei Leerlauf und Belastung vorausgesetzt) induziert werden müßte, und welche bei einem Ankerstrom i_a einer geradlinigen Kurzschlußstromkurve bezw. einer konstanten Stromdichte unter den Bürsten entspricht, lautet nun

$$e_o = e_q + e_r + 2\, i_a (R_s + 2\, R_v) \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Dieser spezielle Wert von e_o wurde im Bd. I mit e_k bezeichnet.

Die in der kurzgeschlossenen Spule vom kommutierenden Felde, das von den Feld- und Ankeramperewindungen gemeinsam erzeugt wird, induzierte EMK ist in diesem Fall

$$e_o - e_q = e_r + 2\, i_a (R_s + 2\, R_v) \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Die Bedingung für eine reine Widerstandskommutation bei beliebiger Bürstenbreite lautet

$$e_o - e_q = e_r \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

wobei die EMKe als Momentanwerte aufzufassen sind, so daß die gegebene Bedingung in jedem Momente der Kurzschlußzeit einer Spule erfüllt sein muß.

Bezeichnet B_o die Feldstärke, die bei Leerlauf und gleicher Felderregung in der Kommutierungszone besteht, und B_q die von den Ankeramperewindungen allein erzeugte Feldstärke, so ist die resultierende Feldstärke in der Kommutierungszone bei Belastung (s. Bd. I, S. 460 und 461)

$$B_k = B_o - B_q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Digitized by Google

Durch die Bewegung der kurzgeschlossenen Spule im Felde B_k müßte eine EMK induziert werden, welche der Reaktanzspannung e_r gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist. Bei glatten Ankern ist B_k klein, weil e_r klein ist; hier rührt die Reaktanzspannung fast allein vom Streufluß der Spulenköpfe her, bei Nutenankern tritt noch der Streufluß des Nutenraumes und der Zahnköpfe hinzu.

Die Reaktanzspannung ist eine bestimmte, durch die Form der Kurzschlußstromkurve bedingte Funktion der Zeit und sie kann daher durch die Bewegung der Spule nur in jedem Momente kompensiert werden, wenn das kommutierende Feld eine solche Form hat, daß die durch die Bewegung der Spule induzierte EMK dieselbe Funktion der Zeit ist. Die aus dieser Bedingung hervorgehende Feldform ist praktisch nur in besonderen Fällen zu erreichen, wir müssen daher in der Regel damit rechnen, daß selbst bei günstiger Form und Stärke des Feldes die Bedingung (3) während der Kurzschlußzeit nicht dauernd, sondern nur in einzelnen Momenten erfüllt wird, und daß zusätzliche Ströme auftreten.

Im ersten Band wird der Höchstwert der in allen kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMK ΔE (die maximale Kurzschlußspannung) berechnet. Aus den auch im Vorwort angegebenen Gründen berechnen wir jetzt die Kurzschlußspannung mit dem Mittelwert e_{rs} der Reaktanzspannung, die in der maximalen Zahl S_k der kurzgeschlossenen Spulen induziert wird. Dieser Wert ist allgemein

$$\Delta e = S_k (e_o - e_q - e_{rs}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Die Gleichung für den zusätzlichen Strom (Gl. 191, Bd. I, S. 490) und alle daraus gezogenen Schlüsse werden durch obige Änderungen nicht berührt.

Bemerkung zu S. 279. Die Messungen wurden von Herrn Dr.-Ing. Niebuhr an dem Anker ausgeführt, dessen Abmessungen in der Fußnote S. 279 angegeben sind. Der Anker war aus dem Magnetgestell entfernt. Ein Wechselstrom von hoher Frequenz wurde in die in Fig. 337, S. 278, mit Null bezeichnete Spule und in die Meßanordnung eingeführt.

Wenn alle übrigen Spulen offen waren, wurde bei 50 Perioden der Selbstinduktionskoeffizient L_N der Spule, und wenn eine der übrigen Spulen widerstandslos kurzgeschlossen war, der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient $L_s = k_d L_N$ bei verschiedenen Periodenzahlen gemessen. Daraus ergibt sich zunächst der Dämpfungsfaktor k_d.

Digitized by Google

Aus der Gleichung

$$L_s = L_1 - \frac{\omega^2}{\left(\frac{R_2}{L_2}\right)^2 + \omega^2} \cdot \frac{M_{1,x}}{L_2}$$

wurde unter Zugrundelegung von konstanten Werten $\frac{M_{1,x}^2}{L}$ für jede Periodenzahl $\frac{R_2}{L_2}$ berechnet und für $c = \frac{\omega}{2\pi} = 50$ Perioden das gemessene Verhältnis gleich dem berechneten gesetzt. Auf diese Art konnten die Werte von k_ω rückwärts gefunden werden. Es ergab sich, daß für ein bestimmtes Verhältnis von $R_2 : L_2$ der Faktor k_ω mit der Periodenzahl anfangs rasch ansteigt und von etwa 700 Perioden pro Sekunde an konstant bleibt. Bei dem zu den Messungen benützten Anker war

$$\frac{R_2}{L_{2\,(50)}} = 1{,}79 \cdot 10^3 \quad \text{und} \quad k_{\omega\,(700)} = 0{,}722.$$

Die Werte der Tabelle beziehen sich auf 700 Perioden.

Koeffizienten der Selbstinduktion, der scheinbaren Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion eines Nutenankers für 700 Perioden.

Spulen	$L_{N(50)}$ Mikrohenry	$L_s = k_d \cdot L_N$ Mikrohenry	k_d	k_ω	M Mikrohenry	$\frac{M}{L_N}$
0—1	5,675	1,757	0,31	0,722	5,56	0,98
0—2	5,675	2,158	0,38	0,722	5,26	0,927
0—3	5,675	4,56	0,805	0,722	2,96	0,522
0—4	5,675	4,575	0,806	0,722	2,94	0,518
0—1′	5,675	4,43	0,78	0,722	3,13	0,552
0—2′	5,675	4,48	0,79	0,722	3,065	0,54
0—3′	5,675	4,51	0,795	0,722	3,025	0,533
0—4′	5,675	4,92	0,865	0,722	2,44	0,43

Der Koeffizient der scheinbaren Selbstinduktion ist stark abhängig vom Schließungswiderstand der sekundären Spule. Er nähert sich um so mehr dem Werte der Selbstinduktion (d. h. k_d wird um so größer), je größer der Schließungswiderstand ist. Die in der Tabelle angegebenen Werte von L_s, welche dem widerstandslosen Kurzschluß einer Spule entsprechen, stellen daher, für den gegebenen Anker, die kleinsten Werte dar.

Die Abhängigkeit des scheinbaren Selbstinduktionskoeffizienten vom sekundären äußeren Schließungswiderstand (R_a) bei verschie-

Digitized by Google

denen Periodenzahlen zeigt die folgende Tabelle. Die Messung bezieht sich auf zwei aus Drahtlitzen von 1,6/2,0 mm Durchmesser hergestellten Spulen, die übereinander in einer Nut von 10 mm Weite und 21 mm Tiefe lagen, von denen die eine im Meßstromkreis eingeschaltet war und die andere als Sekundärspule diente.

Abhängigkeit des Dämpfungsfaktors k_d vom äußern Schließungswiderstand R_a der Sekundärspule bei verschiedenen Periodenzahlen.

R_a	R_a/R_2	Dämpfungsfaktor k_d		
		$c = 306$	$c = 870$	$c = 1500$
∞	∞	1,0	1,0	1,0
1,0 Ω	11,9	0,95	0,81	0,55
0,5 Ω	5,95	0,92	0,72	0,45
0,25 Ω	2,975	0,85	0,56	0,39
0,1 Ω	1,19	0,74	0,44	0,35
0 Ω	0	0,39	0,31	0,31
Es war $L_1 =$		43,7	42,8	42,45 Mikrohenry.

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß die Dämpfung bei der Kommutation um so besser sein wird, je kleiner der Übergangswiderstand der Bürsten ist.

Digitized by Google

Namen- und Sachregister.

Abonell 2.
Adit 13.
Äquipotentialverbindungen, Anordnung der 110.
— für Schleifenwicklungen 213.
— für Parallelwicklungen 214.
— Berechnungsbeispiel 316.
— Querschnitt und Anzahl der 113.
Ätnamaterial 9.
Akkumulatoren, Geratoren zum Laden von 497.
Alexander, H. 524.
Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft 10. 22. 64. 125. 131. 203. 214. 449. 524. 583.
Ambroin 11.
Amperewindungszahl einer Nebenschlußwicklung 260.
Anker, Anordnung und Isolierung der Wicklung von glatten 23.
— Befestigung des — auf der Welle 45.
— Lackieren, Trocknen und Verkleiden des 36.
— Prüfung der 129.
Ankerbleche, Isolierung der 37.
Ankerdrähte, Berechnung des Querschnittes der 241.
— Berechnung der Zahl der 238.
— Isolierung der 21.
Ankerkern 37.
— Lüftung des 38.
Ankerkörper, Beanspruchung des 305.
— für Ringanker 44.
— für Trommelanker 40.
Ankerlänge, Wahl des Verhältnisses von — zu Polbogen 219.
Ankernuten, Vorzüge und Zweck der 25.
Ankerstern, Beanspruchung der Speichen des 310.
Ankerwicklung, Wahl der 212.
Ankerzweigstrom 212. 239.
Anlaßaggregat, Anlassen mittels 519.
Anlaßwiderstände, Berechnung der 421.
— Stufung der 416.
Anlauf eines Motors 408. 518.
Anlaufstromstärke 412.
Anlaufverlust 412.
Anlaufzeit 412.
Armalack 14.
Asbest 9.
Asolit 13.
Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi 30. 43. 59. 66. 82. 135. 139. 174. 214. 231. 402. 516. 575.
Ausbalancierung, statische 131.
— dynamische, 131.
— der rotierenden Teile 131.
Ausgleichleitung für parallel geschaltete Doppelschlußgeneratoren 469.
Ausgleich stark veränderlicher Belastungen durch Puffersysteme 505.
Ausgleichringe 111.

Bahnbetrieb, Maschinen für 462.
Baur 5.
Beleuchtung, Maschinen für 460.
Berechnung, ausführliche eines Doppelschlußgenerators 312.
— eines Hauptstromgenerators 372.
— eines Wendepolmotors 357.
Bergmann, Elektrizitäts-Werke, Berlin 58. 138. 538.
Blechbänder zur Befestigung der Wicklung 106.
Boudreaux, Metallbürsten Patent 54.
Bragstad, O. S. 419.
Bremswiderstände, Berechnung der 422.
Brown, Boveri & Cie., Aktiengesellschaft 30. 59. 108. 133. 193. 386. 530. 575.
Brown, C. L. 504.
Bürsten 53.
— Kontaktfläche der 250.
Bürstenbreite 251.

Digitized by Google

Bürstenhalter 54.
— für Metallbürsten 55.
— für Kohlenbürsten 57.

Collischonn, F. 461. 581.
Compagnie de l'Industrie Electrique et Mécanique, Genf 3. 57. 177. 490. 503.
Compagnie des Mines de Ligny-les-Aire 529.
Compagnie Générale Electrique, Nancy 30. 103. 111. 113. 165. 172. 231. 402.
Compagnie Internationale d'Electricité, Lüttich 214.
Cornit 11.
Crompton & Co. 5.
Cutler-Hammer Manufacturing Co. 533.

Déri, M. 208. 211. 234.
Dettmar, G. 208. 556.
Deutsche Elektralackfabrik, Bruchsal (Baden) 14.
Deutsche Waffen- und Munitionsfabriken 143. 144.
Dielectric Mfg. Co. 7.
Dolivo-Dobrowolsky 551.
Doppelschlußwicklung, Anordnung der 126.
— Berechnung einer 264.
Drahtbänder, Beanspruchung der 307.
Drahtbänder zur Befestigung der Wicklung 104.
Drahtlitzen 20.
Drahtwicklung, aus Formspulen 76.
— von Hand ausgeführt 71.
Drehmoment 408.
Dreileitermaschine von Dettmar 556.
— von Osanna 554.
Dreileitersystem 547.
Durchmesserwicklung 73.
Durchschlagfestigkeit 1.

Ebonit 10.
Edler, R. 459.
Egger 447.
Eickemeyer, R. 90.
Eisengewicht, Abhängigkeit des — vom Verhältnis Ankerlänge zu Polbogen 220.
— Abhängigkeit des — von der Polzahl 222.
Eisenhöhe des Ankers 245.
Elektralack 14.
Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Kolben & Co. 30. 63. 111. 145. 149. 152. 154. 169. 231. 402. 578.
Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth 30. 43. 44. 55. 63. 68. 87. 89. 91. 139. 174. 231. 402.
Elektrotechn. Institut der Techn. Hochschule Karlsruhe 9. 247. 278.
Emaildrähte der A. E. G. 22.
Emailwiderstände 440.
Empire Cloth 16.
Endruweit-Metallbürsten 54.
Erens, T. 435.
Erlacher 440.
Erregung, Berechnung der 259.
Erregerwicklung, vorläufige Berechnung des Wicklungsraumes der 258.
— Ausschalten der 445.
E. T. I. (Elektrotechnisches Institut der Techn. Hochschule Karlruhe) 9. 247. 278.
Excelsiorlack 14.

Fabrik elektr. Maschinen vorm. A. Ebert 231. 402.
Farrington 8.
Feldkurven, Berechnung der 300. 340.
Feldmagnete, Material der 115.
Felten & Guilleaume-Lahmeyerwerke 30. 49. 52. 58. 106. 111. 124. 179. 188. 200. 214. 386. 514. 529. 579. 581.
Ferranti 133.
Festigkeit des Konstruktionsmaterials 302.
Festigkeitsberechnungen 302.
Fiber 12.
Fischer-Hinnen 448.
Fliehkraft, Beanspruchung durch die 303.
Flüssigkeitswiderstände 444.
Förderanlagen, elektrische 520.
Fördermotor 174.
Füllfaktor der Nut 29.

Ganz'sche Elektrizitäts-Aktiengesellschaft 61. 159. 231. 402.
Gelenkschablonen 78.
General Electric Co. 134. 446.
Generatoren für konstante (oder annähernd konstante) Klemmenspannung bei konstanter Tourenzahl 205. 460.
— für annähernd konstante Klemmenspannung bei konstantem äußeren Widerstande und veränderlicher Tourenzahl 206. 474.
— für konstante Stromstärke 206. 489.
— für veränderliche Spannung und Stromstärke 497.
— zum Laden für Akkumulatoren 497.

Digitized by Google

Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe i. B. 30. 42. 57. 65. 66. 96. 133. 135. 136. 152. 162. 171. 183. 231. 386. 402. 563.
Gewichte, Einfluß der Polzahl auf die — der aktiven Materialien 221.
— Einfluß der Größe der linearen Belastung AS auf die — 225.
Gewichte berechneter Maschinen 335. 356. 369. 401.
Geyer 524.
Gleitlager 135.
Gleitlager mit Kugelschalen 138.
Glimmer 7.
Görges, H. 417.
O'Gorman 7. 16.

Handwicklung 71.
Hartgummi 10.
Hauptabmessungen, Formeln zur Berechnung der — der Maschine 223.
— Berechnung der 233.
— Tabelle über — und berechnete Größen ausgeführter Maschinen 402.
Hauptschlußmotoren, Haupteigenschaften der 487.
— Verfahren zur Tourenregulierung von 542.
Hauptschlußwicklung, Berechnung einer 263.
Hauptschlußzusatzmaschine 500.
Hauptstromkraftübertragung Moutiers-Lyon 177. 492.
Hauptstrommaschine, Kommutation einer 380.
Highfield 508.
Hobart 2. 7. 16. 29. 116.
Hochspannungsgenerator 177.
Holitscher 12. 20.
Holman, G. U. G. 473.
Hopkinson, J. 547.
Hunke, E. 432. 434.

Ilgner 522.
Imprägnierstoffe 13.
Induktionen im Ankerkern 245.
— im Joch 257.
— im Magnetkern 257.
— in den Zähnen 244.
Isolation, Prüfung der 128.
Isola-Werke, Oerlikon-Zürich 13.
Isolierfestigkeit 1. 17.
Isolierlacke 13.
Isolierstoffe, Grad der Sicherheit bei ihrer Verwendung 17.
— gebräuchlichste und ihre Verwendung 6.
— Einfluß hoher Temperatur bei längerer Einwirkung auf die 5.
Isolierstoffe, Untersuchung der 1.
Isolit 13.
Isolierpapier 11.
Isolierung der Ankerbleche 37.
— der Ankerdrähte 21.
— des Kommutators 47.
— der Magnetspulen 123.

Jacob 508.
Jacobi 470.
Jessen 451.
Joch, Material des 115.
Jochquerschnitte 119.
Johnson-Lundell Electric Traction Co. 116.

Kallmann Martin 443. 447.
Kapp 501.
Kapselmotor 147.
Keile, Beanspruchung der 307.
Keile zur Befestigung der Wicklung 105.
Kingdon 556.
Kinzbrunner, C. 3. 10. 11. 15.
Klöckner J., 439. 448. 449. 455.
Kommutationskurven, experimentell ermittelte 293.
Kommutator 46.
— Abmessungen des 247.
— Berechnung der Zahl der Lamellen des 238.
— Isolierung des 47.
— Kühlung des 247.
— Länge des 252.
Kommutatorkonstruktionen 48.
Kommutatorlamellen, Beanspruchung der 307.
Kommutierung, Wahl der Hilfsmittel für die 208.
—, Nachprüfung der Maschine auf —, Berechnungsbeispiel 332. 354. 369.
—, Nachrechnung der Maschine bezüglich — 288.
Kompensationswicklung 211.
— Beispiele ausgeführter Maschinen mit — 190. 193. 392.
Kraftübertragung mit veränderlicher Spannung und Stromstärke 502.
Kraftübertragungssystem Thury 489.
Kugellager 143.
Kupfergewicht, Einfluß der Größe der linearen Belastung AS auf das — 225.
— Einfluß des Verhältnisses von Ankerlänge zu Polbogen auf das — 220.
— Einfluß der Polzahl auf das — 222.

Lagerkonstruktionen 134.
Lagerschildtype 152. 179.

Digitized by Google

Lamellen, Berechnung der Zahl der — des Kommutators 238.
Langdon-Davies, W. 77.
Laufringsystem 143.
Leinöl 13.
Levy, Dr. M. 440
Lewis 12.
Livingstone, R. 309.
Luftinduktion, Werte der 225.
Luftscheibe 39.
Luftspalt, Größe des 253.

Magnetgestell, Entwurf des 256.
Magnetkern 115.
— Befestigung des — mit dem Joch 117.
Magnetspulen 122.
— mit Lüftung 125.
— Prüfung der 129.
Mallet 81.
Manilapapier 11.
Maschine mit zwei Kommutatoren 169. 203.
Maschinen mit zwei Ankerwicklungen und zwei Kommutatoren zur Spannungsteilung beim Dreileitersystem 551.
Maschinenfabrik Oerlikon 18. 30. 51. 57. 60. 64. 69. 106. 113. 119. 141. 164. 167. 186. 203. 214. 231. 386. 402. 502. 565. 566. 573.
Maschinenkonstante 224. 233. 234.
Megohmit 8.
Megotalc 8.
Menges C. L. R. E. 447.
Meirowsky & Co. 8. 14.
Metallbürsten 53.
Metallkappen, zum Festhalten der Spulenköpfe 107. 193.
Metallkohlenbürsten 54.
Metallurgische Zwecke, Maschinen für 464.
Metallwiderstände, Bemessung der 437.
Meyersberg, G. 513.
Mikanit 7.
Mikanitcloth 9.
Mikanitleinwand 9.
Mikanitpapier 9.
Milch, M. 475.
Milne, G. G. 475.
Morganite-Bürsten 53.
Morris-Hawkins Electric Co. 121.
Motoren für konstante Klemmenspannung und Nebenschlußerregung 206. 486.
— für konstante Klemmenspannung und Hauptschlußerregung 206. 487.
— für konstante Klemmenspannung und Doppelschlußerregung 207. 488.
— für konstante Stromstärke 207. 490.
Motoren für veränderliche Spannung und Stromstärke 207. 502.
Motorgenerator 162.
Moutiers-Lyon, Kraftübertragung 492.
Müller, Hermann 446. 454.
Müller, Maximilian 424.

National Physical Laboratory 5.
Nebenschlußgeneratoren, Parallelschaltung von 465.
Nebenschlußmotor, Eigenschaften des 486.
Nebenschlußmotoren, Regulierung der Tourenzahl 532.
Nebenschlußwicklung, Berechnung einer 260.
Niebuhr, H. 278. 279. 292. 587.
Niethammer 133. 139. 444. 447. 452.
Nuten, Berechnung der 243.
Nutenanker, Anordnung der Wicklung bei 26.
— Isolierung der Wicklung von 28.
Nutenformen 26.
Nutenzahl 239.

Oelschläger, W. 208. 287.
Osnos, M. 483.
Ossanna 554.

Papier, verwendet zu Isolierzwecken 11.
Parallelschaltung von Nebenschlußgeneratoren 465.
— von Doppelschlußgeneratoren 468.
Parallelwicklung 213.
— mehrfache 213.
Parsons 193.
Pecolit 11.
Perry 2.
Persicaner & Co., Berlin-Wien 11.
Pfiffner, E. 46. 247.
Physikal.-Techn. Reichsanstalt 8.
Pirani 509. 521.
Pochin, E. A. N. 421.
Pohl, R. 208.
Polbogen, Wahl des Verhältnisses von Ankerlänge zu — 219.
Polschuhe 116.
— Befestigung der — mit dem Magnetkern 117.
Polschuhform, Berechnung der 296. 336.
Polzahl, Wahl der 221.
Potentialdifferenz benachbarter Lamellen 216. 240.
Preßspan 12. 16.
Prüftransformator für einzelne Ankerspulen 128.
— für fertige Anker 129.
Pufferaggregat, Wirkungsweise 509.

Digitized by Google

Pufferaggregat, konstruktive Durchbildung 516.
Pufferbatterie, Wirkungsweise 505.
— Anwendung von Zusatzmaschinen bei — 507.
Puffermaschine nach Jacob 508.
— nach Highfield 508.
— nach Pirani 509, 521.
Puffermotor 23.

Querfelddynamo von Rosenberg 477. 500.

Rayner, E. H. 3
Reaktionsbürstenhalter 60.
Regulierung der Tourenzahl von Hauptschlußmotoren 542.
— — von Nebenschlußmotoren 532.
Regulierwiderstände für Erregermaschinen 431.
— für Nebenschlußgeneratoren zum Konstanthalten der Spannung bei veränderlicher Belastung 426.
— für Nebenschlußgeneratoren zur Veränderung der Spannung 430.
— für Motoren 433.
— Schaltung von — für Nebenschlußgeneratoren 447.
Reihenparallelwicklung 214.
Riemer, J. 141.
Rieter & Co. 36.
Ringanker 212.
— Konstruktion von 69.
Röhle 516.
Rosenberg, E. 477. 500.
Rothert 27. 461.
Rüdenberg 275.
Ryan 211.

Sachsenwerk, Licht- & Kraft A.-G. 189. 214. 231. 402.
Schablonenwicklung 76.
Schablonenwicklung der E.-G. Alioth 87.
— nach Hobart 88.
— nach Eickemeyer 90.
Scherenschablonen 78.
Schleifenwicklung 213.
Schlichting, H. 262.
Schmiernuten 141.
Schröder, L. 507.
Schrumpfringe, Beanspruchung der 308.
Sehnenwicklung 74.
Seidener 132.
Sengel 554.
Serie- und Parallelschaltung von zwei Motoren 519. 543.
Sever 2.
Siemens, Bros. & Co., London 5. 51. 121.
Siemens & Halske A.-G., Wien 42. 449. 531.
Siemens-Schuckert-Werke 30. 60. 63. 120. 156. 200. 231. 402. 413. 510. 516. 520. 521. 550. 571.
Soanes 77.
Spannungserhöher beim Laden von Akkumulatoren 499.
Spannungsteilung beim Dreileitersystem 548.
— durch Akkumulatoren 548.
— durch Ausgleichmaschinen 549.
— System von Dolivo-Dobrowolsky 551.
Sprague-Compagnie 544.
— Schaltung 545.
Spulenkasten 122.
Stabilit 10.
Stabwicklung 98.
Steinmetz 5. 7. 9. 18.
Sterling Varnish 14.
St. Louis Transit Co. 129.
Stollberg, H. F., Offenbach (Main) 37.
Strecker 555.
Stribeck 143.
Stromableitungen 62.
Stromdichte, Abhängigkeit der — von der Erwärmung 242.
— in den Ankerdrähten 241.
— in der Hauptschlußwicklung 264.
— in der Nebenschlusswicklung 262.
Stromvolumen einer Nut 239.
Sumec 224.
Symons 10. 12. 16.

Tandem-Anlaß- und Regulierverfahren 538.
Thomson, Dr. 16.
Thury 206. 207. 489.
Toplis 51.
Tourenregulierung durch Änderung der zu induzierenden EMK 532. 542.
— durch Änderung der Polzahl 538.
— — der Windungszahl 538.
— — des Kraftflusses 537. 544.
Tourenzahl 217.
Trommelanker 212.
— mit Stabwicklung 98.
Trudelle 450.
Turbogeneratoren, Beispiele ausgeführter 183. 186. 193. 200. 203.
— Maschinenkonstante von 234.
Turbogeneratorlager 139. 141.
Turner 2. 7. 16.

Umfangsgeschwindigkeit 217.
Union Elektrizitätsgesellschaft Berlin 123. 569.

Digitized by Google

Vereinigte Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Wien 30. 137. 147. 214. 231. 402.
Vereinigte Isolatorenwerke, Berlin-Pankow 11.
Vertikale Welle, Maschine mit 147. 149. 164. 165.
Volta, Aktiengesellschaft, Reval 110. 123. 124. 136. 214. 559. 561.
Vorausberechnung, Allgemeines über 205.
— Grundlagen der 205.
Vulkanasbest 9.

Walter 5.
Walzenzugmaschinen, elektrischer Antrieb von 524.
Ward-Leonard-Schaltung 520.
Wellenwicklung 214.
Wendefeld, Stabilität des 287.
— Form und Stärke des 284.
Wendepolbreite 281.
Wendepole, Beispiele ausgeführter Maschinen mit 181. 183. 186. 188. 193. 203.
— Berechnung der 281.
Wendepole, Berechnungsbeispiel 349. 363.
— Material und Form der 119.
— Nachteile der 210.
— Vorteile der 208.
Wendepollänge 282.
Wendepolmotor, Berechnung eines 357.
Wendepolwicklungen 119.
Western Electric Co. 58.
Westinghouse Electric & Mfg. Co., Pittsburg 89. 126. 543.
Wicklungskappen, Beanspruchung der 307.
Widerstandsapparate für Motoren mit Umkehrung der Drehrichtung 453.
— ohne Umkehrung der Drehrichtung 448.
Wood, Cleveland 43.

Zähne, Beanspruchung der 305.
Zingler, V. 439.
Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung von Gleichstrommaschinen 386.
Zusatzaggregat 158.
Zusatzmaschinen 499.

Digitized by Google

Erklärung der in den Formeln verwendeten Buchstaben.

(Die beigedruckten Zahlen geben die Seite an, auf der die betreffende Bezeichnung eingeführt wird. Auf den durch * kenntlich gemachten Seiten sind Formeln für die betreffenden Größen zu finden.)

A.

A = $\frac{R_u T}{L_{1z}} = \frac{R_w T}{F_u L_{1z}}$ I, 419*; 424*.

A_a = Abkühlungsfläche des Ankers I, 742*.

A_k = Abkühlungsfläche des Kommutators I, 747.

A_m = Abkühlungsfläche der Magnetspulen I, 739*.

AS = Stromvolumen pro 1 cm Ankerumfang (lineare Belastung) I, 300.

AW = Amperewindungen I, 261.

AW_a = Amperewindungen pro magnetischen Kreis für den Ankerkern I, 282.

AW_e = entmagnetisierende Amperewindungen des Ankers pro magnetischen Kreis I, 311*.

AW_j = Amperewindungen pro magnetischen Kreis für das Joch I, 283*.

AW_k = Amperewindungen pro magnetischen Kreis bei Belastung I, 329*.

$AW_{k\,o}$ = Amperewindungen pro magnetischen Kreis bei Leerlauf I, 261*.

AW_l = Amperewindungen für den doppelten Luftspalt I, 268*.

AW_m = Amperewindungen pro magnetischen Kreis für die Magnetkerne I, 283*.

AW_N = Amperewindungen pro Wendelpolpaar bezw. pro Wendepol zur Erzeugung des Wendefeldes I, 583*; II, 282*.

AW_p = für zwei Polspitzen verbrauchte Amperewindungen I, 462*.

AW_q = Amperewindungen, welche der entmagnetisierenden Wirkung des Ankerquerfeldes entsprechen I, 314*.

$AW_r = AW_e + AW_y$ = längsmagnetisierende Ankeramperewindungen I, 327*.

AW_t = Gesamte Amperewindungszahl der Feldwicklung bei Belastung II, 260*.

$AW_{t\,o}$ = Gesamte Amperewindungszahl der Feldwicklung bei Leerlauf II, 260*.

AW_w = Erforderliche Amperewindungszahl eines Wendepolpaares bezw. Wendepoles I, 583*; II, 282*.

AW_z = Amperewindungen pro magnetischen Kreis für die Zähne I, 278*.

a = Halbe Anzahl der Ankerzweige I, 56.

a_a = Spezifische Kühlfläche des Ankers I, 742*.

a_k = Spezifische Kühlfläche des Kommutators I, 747*.

a_m = Spezifische Kühlfläche der Magnetspulen I, 739*.

a_w = Amperewindungen pro 1 cm des Kraftlinienweges I, 262.

Digitized by Google

α und α_i = Verhältnis des Polbogens zur Polteilung.
α_n = resultierender Schrittfehler bei Nutenankern mit Äquipotentialverbindungen I, 193*.
α_r = Schrittfehler bei glatten Ankern mit Äquipotentialverbindungen I, 177*.

B.

B = Induktion oder Kraftlinienzahl pro cm² I, 10*.
B_a = Induktion im Ankerkern I, 282*.
B_j = Indnktion im Joch I, 283*.
B_l = Induktion im Luftspalt I, 267*.
B_m = Induktion im Kern der Feldmagnete I, 282*.
B_q = Feldstärke des Ankerfeldes in der Kommutierungszone I, 461*.
$B_{w\,l}$ = Induktion im Luftspalt unter den Wendepolen II, 281*.
$B_{w\,m}$ = Induktion im Wendepolschenkel II, 282*.
B_z = Induktion in den Zähnen I, 277*.
$B_{z\,i}$ = ideelle Zahninduktion I, 279*.
$B_{z\,w}$ = wirkliche Zahninduktion I, 279*.
b_c = auf den Ankerumfang reduzierte Bürstenverstellung I, 311.
b_D = auf den Ankerumfang reduzierte Bürstenbreite I, 363*.
b_i = ideeller Polbogen I, 267*.
b_r = auf die einfache Parallelwicklung reduzierte Bürstenbreite I, 360*.
b_w = Wendépolbreite I, 577*.
$b_{w\,i}$ = ideelle Wendepolbreite I, 581*.
b_1 = Bürstenbreite I, 358.
β = Lamellenteilung I, 358.
β_D = auf den Ankerumfang reduzierte Lamellenteilung I, 363*.

C.

C_a, C_k, C_m = Koeffizient der Wärmeabgabe des Ankers, des Kommutators, der Feldmagnete I, 743*; I, 747*; I, 739*.
C_N = Konstante II, 278.
c = Periodenzahl I, 8*.

D.

D = äußerer Durchmesser des Ankereisens.
D_i = innerer Durchmesser des Ankereisens.
D_k = Kommutatordurchmesser.
D_m = Durchmesser des Magnetkernes II, 318.
d_n = Durchmesser des Drahtes der Nebenschlußwicklung II, 261.
Δ = Blechdicke in mm.
δ = Größe des Luftspaltes unter den Hauptpolen I, 266.
δ_w = Größe des Luftspaltes unter den Wendepolen.

E.

E = Elektromotorische Kraft (EMK) I, 18; 59.
E_a = induzierte EMK eines Ankerzweiges I, 326*.
e = induzierte EMK.
e_o = die vom Hauptfeld in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK II, 269.
e_q = die vom Ankerquerfeld in einer kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK II, 272*.
e_r = der Momentanwert der Reaktanzspannung einer Spule II, 269; II, 277*.
$e_{r\,max}$ = maximale Reaktanzspannung einer Spule II, 277*.

Digitized by Google

e_{rd} = mittlere Reaktanzspannung einer Spule II, 269; II, 273*.
e_s = effektive Reaktanzspannung (Funkenspannung) II, 288*; I, 510*.
Δe_o = Kurzschlußspannung bei nicht verstellten Bürsten II, 288*.
Δe_v = Kurzschlußspannung bei verstellten Bürsten II, 288*.
ε = halbe Schrittverkürzung I, 356*.
η = Wirkungsgrad.
= Steinmetz'sche Hysteresiskonstante I, 631.

F.

F_b = Auflagefläche aller Bürsten II, 251.
f_w = Formfaktor der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte unter der Bürste I, 444.
Φ = Kraftfluß I, 2*; I, 59.
Φ_a, Φ_m, Φ_j = Kraftfluß im Anker, Magnet, Joch I, 264.
Φ_{wa} = Kraftfluß unter einem Wendepol I, 566.
Φ_{wm} = Kraftfluß im Magnetkern eines Wendepoles I, 566.
Φ_{wf} = vom Wendepol ausgehender Streufluß I, 566.

G.

G_{ka} = Gewicht des Ankerkupfers in kg II, 225.
G_{kk} = Gewicht des Kommutatorkupfers II, 307.
G_{km} = Gewicht des Magnetkupfers II, 226.
G_z = Gewicht der Ankerzähne II, 305.
g = Auflagedruck der Bürsten pro cm² in kg I, 681.
γ = spezifisches Gewicht.

H.

h = Eisenhöhe des Ankers I, 282*.
h_m = radiale Höhe des Magnetpoles I, 290.
h_n = Nutenhöhe II, 316.

I.

J = Stromstärke.
J_a = gesamter Ankerstrom I, 125*.
J_h = Strom in den Hauptschlußwindungen I, 244.
i_a = Strom eines Ankerzweiges I, 49.
i_k = Momentanwert des geradlinigen Kurzschlußstromes I, 367; I, 386*.
i_n = Nebenschlußstrom I, 244.
i_z = Momentanwert des zusätzlichen Kurzschlußstromes I, 367.

K.

K = Lamellenzahl des Kommutators I, 50.
k = EMK-Faktor I, 17*.
k_1 = Verhältnis der Leitfähigkeit des Luftspaltes eines glatten Ankers zu der eines Nutenankers I, 269*.
k_2 = Isolationsfaktor I, 282*; II, 37*.
k_3 = Luftquerschnitt der Nut: Eisenquerschnitt des Zahnes I, 279*.
k_4 = Koeffizient zur Berechnung der Hysteresisverluste in den Zähnen I, 639*.
k_5 = Koeffizient zur Berechnung der Wirbelstromverluste in den Zähnen I, 645*.
k_d = Dämpfungsfaktor II, 278.
k_n II, 290.
k_w II, 292.
k_z I, 275*.

Digitized by Google

L.

L_a, L_j, L_m, L_{wm} = Länge des Kraftlinienweges im Anker, im Joch, in den Hauptpolen, in den Wendepolen I, 262.
L_k = Kommutatorlänge II, 252.
L_N = Selbstinduktionskoeffizient II, 276*.
L_s = Streuinduktionskoeffizient II, 276*.
l = Eisenlänge des Ankers I, 276.
l_a = halbe Länge einer Ankerwindung I, 665*.
l_B = Länge der Bürsten eines Stiftes in der Achsenrichtung I, 424.
l_h = mittlere Länge einer Hauptschlußwindung II, 264.
l_i = ideelle Ankerlänge I, 268; 276*; II, 236*.
l_n = mittlere Länge einer Nebenschlußwindung II, 260.
l_s = Länge eines Spulenkopfes I, 375.
l_w = Wendepollänge I, 575.
l_{wi} = ideelle Wendepollänge I, 566; 581*.
l_1 = gesamte Ankerlänge I, 267.
λ = spezifische magnetische Leitfähigkeit.
λ_j = Leitfähigkeit zwischen Magnet und Joch I, 291*.
λ_{ks} = Leitfähigkeit des Streuflusses zwischen den Nutenkanten II, 273*.
λ_{kz} = Leitfähigkeit zwischen den Zahnköpfen II, 290*.
λ_{Lz} = Leitfähigkeit des vom Strome einer Spule hervorgerufenen totalen Eigenfeldes II, 290*.
λ_m = Leitfähigkeit zwischen den Magnetkernen I, 291*.
λ_{Nn} = Leitfähigkeit des vom Stromvolumen einer Nut hervorgerufenen Streufeldes II, 273*.
λ_{Nz} = Leitfähigkeit des vom Stromvolumen einer Nut hervorgerufenen totalen Eigenfeldes II, 285*; 290*.
λ_n = Leitfähigkeit des Nutenraumes II, 273*.
λ_{nz} = Leitfähigkeit des Nutenraumes für den zusätzlichen Kurzschlußstrom II, 290*.
λ_p = Leitfähigkeit zwischen den Polflächen I, 291*.
λ_q = Leitfähigkeit des Ankerquerfeldes in der neutralen Zone I, 461*.
λ_{qo} = Leitfähigkeit des Ankerquerfeldes in der neutralen Zone bei nicht verstellten Bürsten I, 463*.
λ_{qv} = Leitfähigkeit des Ankerquerfeldes in der neutralen Zone bei verstellten Bürsten I, 462*.
λ_s = Leitfähigkeit für das Feld eines Spulenkopfes I, 374*; II, 273*.

N.

N = Draht- oder Stabzahl eines Ankers I, 60*.
n = Zahl der Umdrehungen pro Minute.
n_z = Zahl der Luftschlitze im Anker II, 236.
ν = Verhältnis von Nutenweite zu Luftraum I, 271*.

O.

ω = Winkelgeschwindigkeit.

P.

P = Klemmenspannung.
P_{dk} = maximale Potentialdifferenz zweier benachbarter Lamellen I, 529*.
ΔP = Potentialdifferenz zwischen Kommutator und Bürste I, 330.

Digitized by Google

p = Zahl der Polpaare I, 50.
p_w = Zahl der aufeinander folgenden gleichnamigen Bürsten, welche weggelassen sind I, 358.

Q.

Q_a, Q_j, Q_m, Q_{wm} = Querschnitt des Ankerkerns, des Joches, der Hauptpole, der Wendepole I, 266*.
q_a = Querschnitt eines Ankerdrahtes I, 665.
q_h = Querschnitt eines Drahtes der Hauptschlußwicklung I, 667.
q_n = Querschnitt eines Drahtes der Nebenschlußwicklung I, 666.

R.

R_a = Ankerwiderstand I, 594; 665*.
R_h = Widerstand der Hauptschlußwicklung I, 602; 667*.
R_n = Widerstand der Nebenschlußwicklung I, 606; 666*.
R_π = spez. Übergangswiderstand unter den Bürsten I, 350; 424.
r, r_1, r_3 bis r_8 = Nutenabmessungen I, 371; II, 290.
r_n = Regulierwiderstand im Nebenschlußkreis I, 666.
ϱ = spezifischer Widerstand I, 647.

S.

S = Spulenzahl I, 60.
S_k = Zahl der von einer Bürste kurzgeschlossenen Spulen I, 464*.
s = Zahl der Spulenseiten einer Wicklung I, 68*.
s_a = Stromdichte im Ankerdraht II, 241*.
s_h = Stromdichte in der Hauptschlußwicklung II, 264*.
s_n = Stromdichte in der Nebenschlußwicklung II, 262*.
s_u = mittlere örtliche Stromdichte unter der Bürste I, 333; 444*.
σ = Streukoeffizient I, 264; 287*; 291*.
$\cdot$ = mechanische Beanspruchung in kg/cm² II, 303*.
σ_a = I, 266*.
σ_b = Biegungsbeanspruchung II, 308*.
σ_h = Hysteresiskonstante I, 634*; 663.
σ_k = Streukoeffizient der Wendepole I, 568; II, 282.
σ_w = Wirbelstromkonstante I, 641*; 663.

T.

T_a = Temperaturerhöhung des Ankers I, 665; 742*.
T_k = Temperaturerhöhung des Kommutators I, 747*.
T_m = Temperaturerhöhung der Magnetspulen I, 666; 739*.
T_N = Kurzschlußzeit des Stromvolumens einer Nut I, 360*.
t, t_1, t_2 = Nutenteilung I, 192.
τ = Polteilung I, 4.
= Schubbeanspruchung II, 306.
ϑ = Drehmoment I, 696*.
ϑ_a = auf den Anker ausgeübtes Drehmoment II, 408*.

U.

U_s = Umfang des Spulenkopfes II, 273.
u_k = Anzahl der pro neutrale Zone im Kurzschluß befindlichen Spulenseiten I, 338.
u_n = Zahl der Spulenseiten einer Nut I, 100*.

Digitized by Google

V.

V_a = Eisenvolumen des Ankerkernes I, 634.
V_z = Eisenvolumen der Zähne I, 640.
v = Umfangsgeschwindigkeit des Ankers I, 14*.
v_k = Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators I, 360.
v_z = Zapfengeschwindigkeit I, 671.

W.

W_{ei} = Eisenverluste I, 663.
W_H = Verlust in der Hauptschlußwicklung I, 667*.
W_h = Hysteresisverlust I, 631*.
W_{ka} = Verlust durch Stromwärme im Ankerkupfer I, 665*.
W_L = Verlust durch Luftreibung I, 680.
W_n = Verlust in der Nebenschlußwicklung I, 666*.
W_p = Verlust in den Polschuhen I, 647; 649*.
W_R = Verlust durch Lagerreibung I, 676*.
W_r = Verlust durch Bürstenreibung I, 681*.
W_u = Bürstenübergangsverlust I, 332; 668*.
W_w = Wirbelstromverlust I, 641*.
w_h = Windungszahl der Hauptschlußwicklung I, 667.
w_n = Windungszahl der Nebenschlußwicklung I, 666.

X.

x = Konstante zur Berechnung von k_1 I, 271*; 276*.
X = Ankerkonstante II, 400.

Y.

y = resultierender Wicklungsschritt I, 55; I, 69*.
y_1, y_2 = Teilschritte I, 69*.
y_k = Kommutatorschritt I, 69*.
y_n = Nutenschritt I, 100*.
y_p = Potentialschritt I, 171*.

Z.

Z = Nutenzahl I, 103.
z_1 = Breite des Zahnkopfes I, 269.
z_2 = Breite des Zahnfußes 278.

Digitized by Google

Druck von Oscar Brandstetter in Leipzig.

Digitized by Google

Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Arbeitsweise und Berechnung. Von **E. Arnold,** Professor und Direktor des Elektrotechnischen Instituts der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. In zwei Bänden.

Erster Band: Theorie und Untersuchung. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 593 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 20,—

Zweiter Band: Konstruktion, Berechnung, Untersuchung und Arbeitsweise der Gleichstrommaschine. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 502 Textfiguren und 13 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 20.—,

Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von **E. Arnold,** Professor und Direktor des Elektrotechnischen Instituts der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. In fünf Bänden.

Erster Band: Theorie der Wechselströme und Transformatoren. Von **J. L. la Cour.** Mit 263 Textfiguren und 3 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Zweiter Band: Die Transformatoren. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour.** Mit 335 Textfiguren und 3 Tafeln. In Lwd. geb. Preis M. 12,—.

Dritter Band: Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen. Von **E. Arnold.** Mit 426 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Vierter Band: Die synchronen Wechselstrommaschinen. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour.** Mit 514 Textfiguren und 13 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 20,—.

Fünfter Band: Die asynchronen Wechselstrommaschinen. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour.** Befindet sich in Vorbereitung.

Elektromotoren für Gleichstrom. Von Dr. **G. Roefsler,** Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Berlin. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 49 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 4,—.

Elektromotoren für Wechselstrom und Drehstrom. Von Dr. **G. Roefsler,** Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Berlin. Zweite Auflage in Vorbereitung.

Motoren für Gleich- und Drehstrom. Von **Henry M. Hobart,** B. Sc. M. I. E. E. Mem. A. I. E. E. Deutsche Bearbeitung. Übersetzt von **Franklin Punga.** Mit 425 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 10,—.

Die Bahnmotoren für Gleichstrom. Ihre Wirkungsweise, Bauart und Behandlung. Ein Handbuch für Bahntechniker von **H. Müller,** Oberingenieur der Westinghouse-Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, und **W. Mattersdorff,** Abteilungsvorstand der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Mit 231 Textfiguren und 11 lithogr. Tafeln, sowie einer Übersicht der ausgeführten Typen. In Leinwand geb. Preis M. 15,—.

Die Prüfung von Gleichstrommaschinen in Laboratorien und Prüfräumen. Ein Hilfsbuch für Studierende und Praktiker von **C. Kinzbrunner,** Ingenieur und Dozent für Elektrotechnik an der Municipal School of Technology in Manchester. Mit 249 Textfiguren. In Lwd. geb. Preis M. 9,—.

Digitized by Google

Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom. Von **Gisbert Kapp.** Vierte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 255 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. Eine Darstellung ihrer Theorie, Konstruktion und Anwendung. Von **Gisbert Kapp,** Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 185 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 8,—.

Asynchrone Generatoren für ein- und mehrphasige Wechselströme. Ihre Theorie und Wirkungsweise. Von **Cl. Feldmann,** Ingenieur und Privatdozent an der Großherzogl. Technischen Hochschule in Darmstadt. Mit 50 Textfiguren. Preis M. 3,—.

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von **Julius Heubach,** Chef-Ingenieur. Mit 163 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 10,—.

Die Arbeitsweise der Wechselstrommaschinen. Für Physiker, Maschineningenieure und Studenten der Elektrotechnik. Von **Fritz Emde.** Mit 32 Textfiguren. Preis M. 2,40; in Leinwand geb. M. 3,—

Konstruktionen und Schaltungen aus dem Gebiete der elektrischen Bahnen. Gesammelt und bearbeitet von **O. S. Bragstad,** a. o. Professor an der Großherzogl. techn. Hochschule Fridericiana in Karlsruhe. 31 Tafeln mit erläuterndem Text. In einer Mappe Preis M. 6,—.

Über die Entwicklungsmöglichkeiten des Induktionsmotors für Einphasen-Wechselstrom. Von Dr.-Ing. **R. v. Koch.** Mit 49 Textfiguren. Preis M. 2,60.

Elektromechanische Konstruktionselemente. Skizzen, herausgegeben von Dr. **G. Klingenberg,** Professor und Dozent an der Königl. Technischen Hochschule zu Berlin. Erscheint in Lieferungen zum Preise von je M. 2,40. Bisher sind erschienen: Lieferung 1, 2, 3, 4 (Apparate) und 6, 7 (Maschinen); Lieferung 5 erscheint im Winter 1907. Jede Lieferung enthält 10 Blatt Skizzen in Folio.

Elektromechanische Konstruktionen. Eine Sammlung von Konstruktionsbeispielen und Berechnungen von Maschinen und Apparaten für Starkstrom. Zusammengestellt und erläutert von **Gisbert Kapp.** Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 36 Tafeln und 114 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 20,—.

Digitized by Google

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Dr. **A. Thomälen,** Elektroingenieur. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 338 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Von Dr. **G. Benischke.** Zweite, erweiterte Auflage von „Magnetismus und Elektrizität mit Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis". Mit 489 Textfiguren. Preis M. 12,—; in Leinwand geb. M. 13,20.

Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie. Vortrag von **H. A. Lorentz,** Professor an der Universität Leiden. Zweite, durchgesehene Auflage. Preis M. 1,50.

Die neueren Wandlungen der elektrischen Theorien, einschließlich der Elektronentheorie. Zwei Vorträge von Dr. **G. Holzmüller.** Mit 22 Textfiguren. Preis M. 3,—.

Die elektrischen Wechselströme. Für Ingenieure und Studierende bearbeitet. Von **T. H. Blakesley.** Autorisierte Übersetzung von **Cl. Feldmann.** Mit 31 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 4,—.

Die Isolierung elektrischer Maschinen. Von **H. W. Turner,** Associate A. I. E. E. und **H. M. Hobart,** M. I. E. E., Mem. A. I. E. E. Deutsche Bearbeitung von **A. von Königslöw** und **R. Krause,** Ingenieure. Mit 166 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 8,—.

Experimentaluntersuchungen über die Selbstinduktion in Nuten gebetteter Spulen bei hoher Frequenz. Von Dr.-Ing. **H. Niebuhr.** Mit 23 Textfiguren. Preis M. 1,60.

Die Untersuchungen elektrischer Systeme auf Grundlage der Superpositionsprinzipien. Von Dr. **Herbert Hausrath,** Privatdozent an der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. Mit 14 Textfiguren. Preis M. 3,—.

Elektrotechnische Meßkunde. Von **Arthur Linker,** Ingenieur. Mit 385 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 10,—.

Elektrische und magnetische Messungen und Meßinstrumente. Von **H. S. Hallo** und **H. W. Land.** Eine freie Bearbeitung und Ergänzung des holländischen Werkes „Magnetische en Elektrische Metingen" von **G. J. van Swaay,** Professor an der technischen Hochschule zu Delft. Mit 343 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 15,—.

Messungen an elektrischen Maschinen. Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen. Von **R. Krause,** Ingenieur. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 172 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 5,—.

Digitized by Google

Anwendung und Zukunft der Kondensatoren in der Wechselstromtechnik. Von Dipl. Elektroingenieur **W. v. Bistez.** Mit 26 Textfiguren. Preis M. 2,40.

Die Akkumulatoren für Elektrizität. Von Professor Dr. **E. Hoppe.** Dritte, neubearbeitete Auflage. Mit zahlreichen Textfiguren. Preis M. 8,—; in Leinwand geb. M. 9,—.

Herstellung und Instandhaltung elektrischer Licht- und Kraftanlagen. Ein Leitfaden auch für Nichttechniker unter Mitwirkung von **Michalke** verfaßt und herausgegeben von **S. Frhr. v. Gaisberg.** Dritte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. In Leinwand geb. Preis M. 2,40.

Telegraphie und Telephonie ohne Draht. Von **Otto Jentsch,** Kaiserlicher Ober-Postinspektor. Mit 156 Textfiguren. Preis M. 5.—; in Leinwand geb. M. 6,—.

Die drahtlose Telegraphie und ihr Einfluß auf den Wirtschaftsverkehr unter besonderer Berücksichtigung des Systems „Telefunken". Mit einem Verzeichnis der Patente und Literaturangaben über drahtlose Telegraphie. Von Dr. **E. Nesper,** Diplom-Ingenieur. Mit 22 Textfiguren. Preis M. 3,—.

Die Telegraphentechnik. Ein Leitfaden für Post- und Telegraphenbeamte. Von Dr. **Karl Strecker,** Geh. Postrat und Professor. Fünfte, vermehrte Auflage. Mit 375 Textfiguren und 2 Tafeln. Preis M. 5.—; in Leinwand gebunden M. 6,—.

Hilfsbuch für die Elektrotechnik, unter Mitwirkung einer Anzahl Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **K. Strecker,** Geh. Postrat und Professor. Siebente, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 675 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 14.—.

Von wichtigeren oder umfangreichen Änderungen der vorliegenden Auflage seien erwähnt: Die Kapitel über Messung von Induktionskoeffizienten, Kapazitäten, Dielektrizitätskonstanten, die Wechselstrommessungen, die Aufnahme und Analyse von Stromkurven, die Messungen an elektrischen Straßenbahnen, die Übersicht über die Elektrizitätszähler. Die Abschnitte, welche die Elektromagnete, Transformatoren und Dynamomaschinen, Umformer und Gleichrichter behandeln, im Umfange von 160 Seiten, sind völlig neu bearbeitet. Die Tabellen ausgeführter elektrischer Maschinen sind wieder in der Art wie in der 5. Auflage behandelt. Ein neuer Abschnitt: Das elektrische Kraftwerk, und ein Kapitel über den elektrischen Betrieb von Maschinen sind eingefügt worden. In dem Abschnitt über elektrische Beleuchtung haben die Kapitel über die Lampen eine durchgreifende Umarbeitung erfahren; auch ist der Abschnitt um ein Kapitel über Theaterbeleuchtung erweitert worden.

Ferner wurde ein neuer Abschnitt über die Verwendung der Elektrizität auf Schiffen zugefügt und die Strom-Wärmeerzeugung, worunter auch die früher als besonderer Abschnitt behandelte elektrische Minenzündung, neu bearbeitet. Im Abschnitt über Telegraphie wurde dem neu bearbeiteten Fernsprechwesen ein getrenntes Kapitel zugewiesen und das Pupinsche Verfahren, die Fernsprechleitungen zu verbessern, aufgenommen. Ferner wurde der Telegraphie ohne Draht ein Abschnitt gewidmet. Schließlich wurde ein Anhang beigefügt, welcher die wichtigeren Gesetze, Verordnungen und Ausführungsbestimmungen auf dem elektrischen Gebiete und mit Erlaubnis des Verbandes deutscher Elektrotechniker, dessen Normalien und Vorschriften enthält.

Digitized by Google

Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis. Bearbeitet von **Jos. Herzog,** Vorstand der Abteilung für elektrische Beleuchtung, **Ganz & Co.,** Budapest, und **Cl. Feldmann,** Privatdozent an der Großherzogl. Technischen Hochschule zu Darmstadt. Zweite, umgarbeitete und vermehrte Auflage in zwei Teilen.

Erster Teil: Strom- und Spannungsverteilung in Netzen. Mit 269 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Zweiter Teil: Die Dimensionierung der Leitungen. Mit 216 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12,—.

Handbuch der elektrischen Beleuchtung. Bearbeitet von Oberingenieur **J. Herzog** und Professor **Cl. Feldmann.** Dritte, verbesserte Auflage. Mit 707 Figuren. In Leinwand geb. Preis M. 20,—.

Grundzüge der Beleuchtungstechnik. Von Dr.-Ing. **L. Bloch,** Ingenieur der Berliner Elektrizitätswerke. Mit 41 Textfiguren. Preis M. 4,—; in Leinwand geb. M. 5,—.

Theorie und Berechnung elektrischer Leitungen. Von Dr.-Ing. **H. Gallusser,** Ingenieur bei Brown, Boveri & Co., Baden (Schweiz), und Dipl.-Ing. **M. Hausmann,** Ingenieur bei der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin. Mit 145 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 5,—.

Berechnung und Ausführung der Hochspannungs-Fernleitungen. Von **Carl Fred. Holmboe,** Elektroingenieur. Mit 61 Textfiguren. Preis M. 3,—.

Die Fernleitung von Wechselströmen. Von Dr. **G. Roeßler,** Professor an der Königl. Technischen Hochschule in Danzig. Mit 60 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 7,—.

Der elektrische Lichtbogen bei Gleichstrom und Wechselstrom und seine Anwendungen. Von **Berthold Monasch,** Diplom-Ingenieur. Mit 141 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 9,—.

Die Beleuchtung von Eisenbahn-Personenwagen mit besonderer Berücksichtigung der Elektrizität. Von Dr. **M. Büttner.** Mit 60 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 5,—.

Die künstlichen Kohlen für elektrotechnische und elektrochemische Zwecke, ihre Herstellung und Prüfung. Von Dr. **J. Zellner,** Professor der Chemie an der Staatsgewerbeschule in Bielitz. Mit 102 Textfiguren. Preis M. 8,—; in Leinwand geb. M. 9,—.

Die Preisstellung beim Verkaufe elektrischer Energie. Von **Gust. Siegel,** Diplom-Ingenieur. Mit 11 Textfiguren. Preis M. 4,—.

Die Verwaltungspraxis bei Elektrizitätswerken und elektrischen Straßen- und Kleinbahnen. Von **Max Berthold,** Bevollmächtigter der Kontinentalen Gesellschaft für elektrische Unternehmungen und der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals **Schuckert & Co.** in Nürnberg. In Leinwand geb. Preis M. 8,—.

Digitized by Google

Hilfsbuch für den Maschinenbau. Für Maschinentechniker sowie für den Unterricht an technischen Lehranstalten. Von **Fr. Freytag,** Professor, Lehrer an den technischen Staatslehranstalten in Chemnitz. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 1004 Textfiguren und 8 Tafeln. In Leinwand geb. Preis M. 10,—; in Ganzleder geb. M. 12,—.

Die Hebezeuge. Theorie und Kritik ausgeführter Konstruktionen mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Anlagen. Ein Handbuch für Ingenieure, Techniker und Studierende. Von **Ad. Ernst,** Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der Kgl. Techn. Hochschule in Stuttgart. Vierte, neubearbeitete Auflage. Drei Bände. Mit 1486 Textfiguren und 97 lithogr. Tafeln. In 3 Leinwandbände geb. Preis M. 60,—.

Elastizität und Festigkeit. Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsmäßige Grundlage. Von Dr.-Ingen. **C. Bach,** Kgl. Württ. Baudirektor, Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der Kgl. Techn. Hochschule Stuttgart. Fünfte, vermehrte Auflage. Mit zahlreichen Textfiguren und 20 Lichtdrucktafeln. In Leinwand geb. M. 18,—.

Technische Messungen, insbesondere bei Maschinen-Untersuchungen. Zum Gebrauch in Maschinenlaboratorien und für die Praxis. Von **Anton Gramberg,** Diplom-Ingenieur, Dozent an der Technischen Hochschule zu Danzig. Mit 181 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 6,—.

Technische Mechanik. Ein Lehrbuch der Statik und Dynamik für Maschinen- und Bauingenieure. Von **Ed. Autenrieth,** Oberbaurat und Professor an der Kgl. Techn. Hochschule zu Stuttgart. Mit 327 Textfiguren. Preis M. 12,—; in Leinwand geb. M. 13,20.

Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle, insbesondere zur Kontrolle des Dampfbetriebes. Zugleich ein Leitfaden für die Arbeiten in den Maschinenbaulaboratorien technischer Lehranstalten. Von **Julius Brand,** Ingenieur, Oberlehrer der Königl. vereinigten Maschinenbauschulen zu Elberfeld. Mit 301 Textfiguren, 2 Tafeln und zahlreichen Tabellen. Zweite, verbesserte Auflage. In Leinwand geb. Preis M. 8,—.

Entwerfen und Berechnen der Dampfmaschinen. Ein Lehr- und Handbuch für Studierende und angehende Konstrukteure. Von **Heinrich Dubbel,** Ingenieur. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 427 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 10,—.

Die Dampfkessel. Ein Lehr- und Handbuch für Studierende Technischer Hochschulen, Schüler Höherer Maschinenbauschulen und Techniken sowie für Ingenieure und Techniker. Bearbeitet von **F. Tetzner,** Oberlehrer an den Kgl. Vereinigten Maschinenbauschulen zu Dortmund. Mit 149 Textfiguren und 38 Tafeln. Dritte Auflage. In Leinwand geb. Preis M. 8,—.

Werkstattstechnik. Zeitschrift für Anlage und Betrieb von Fabriken und für Herstellungverfahren. Hersg. von Dr.-Ing. **G. Schlesinger,** Professor an der Technischen Hochschule zu Berlin. Monatlich ein Heft von 48—64 S. Quart. Preis des Jahrgangs M. 15,—. Probehefte stehen gerne zur Verfügung.

Digitized by Google

Fig. 1.

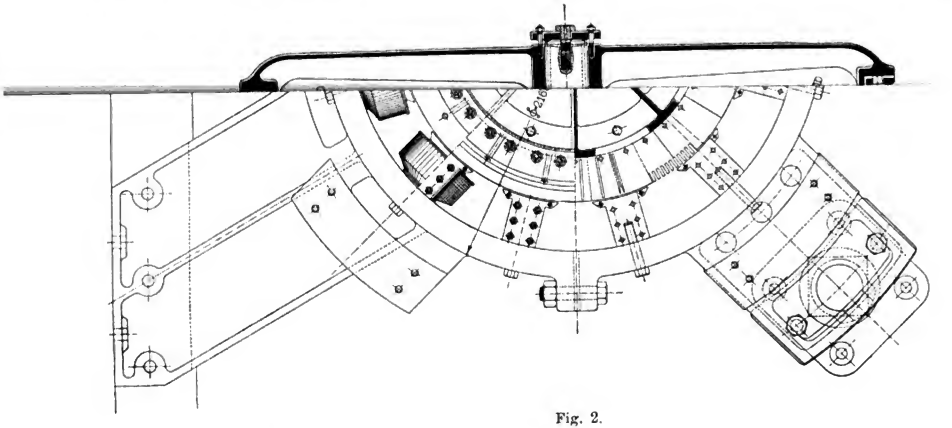


Fig. 2.

Maschinenfabrik Oerlikon.Umformer, 560 KW, 330 Umdr. pro Min.

Fig. 1 und 2. Gesamtanordnung.

(Beschreibung auf Seite 164.)

Digitized by Google

Tafel II.

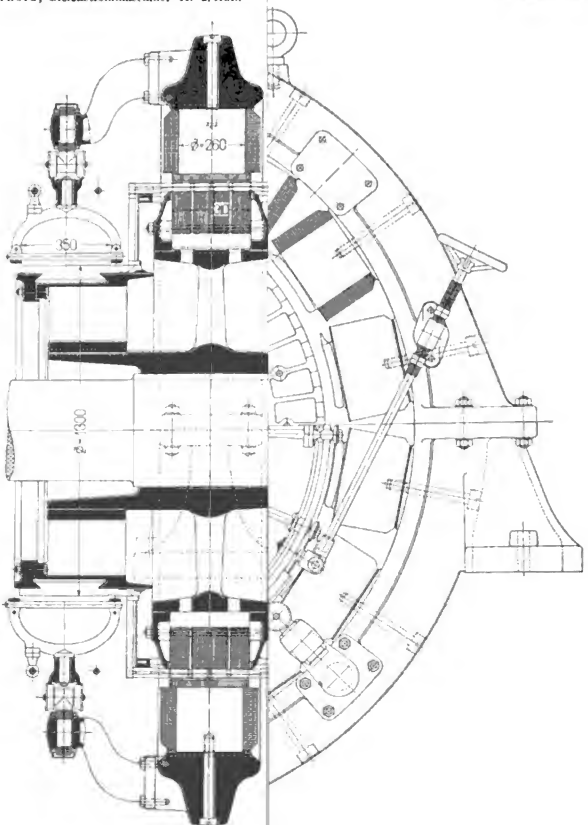
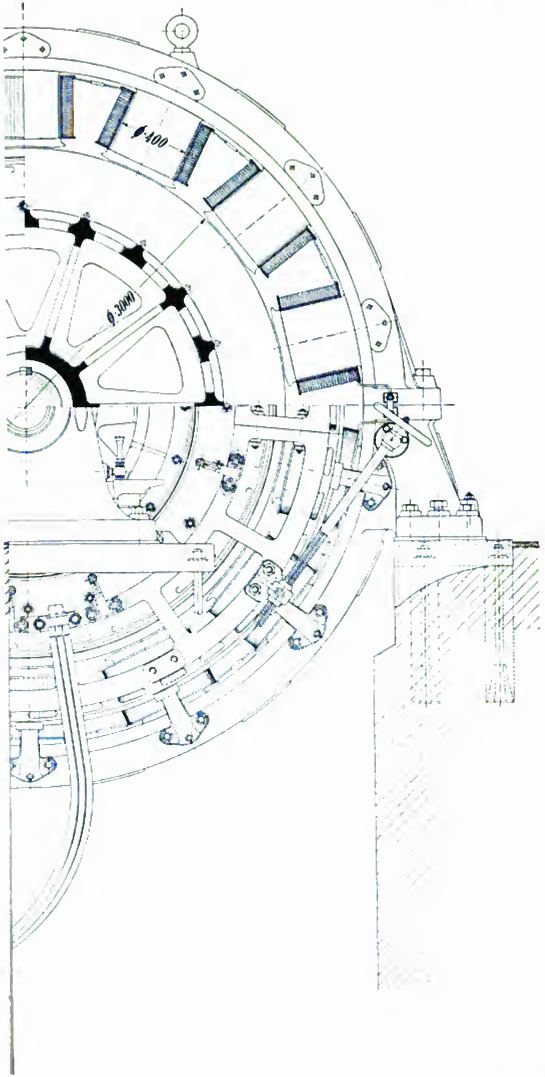


Fig. 1.

Gesellsdr. pro Min.

Digitized by Google

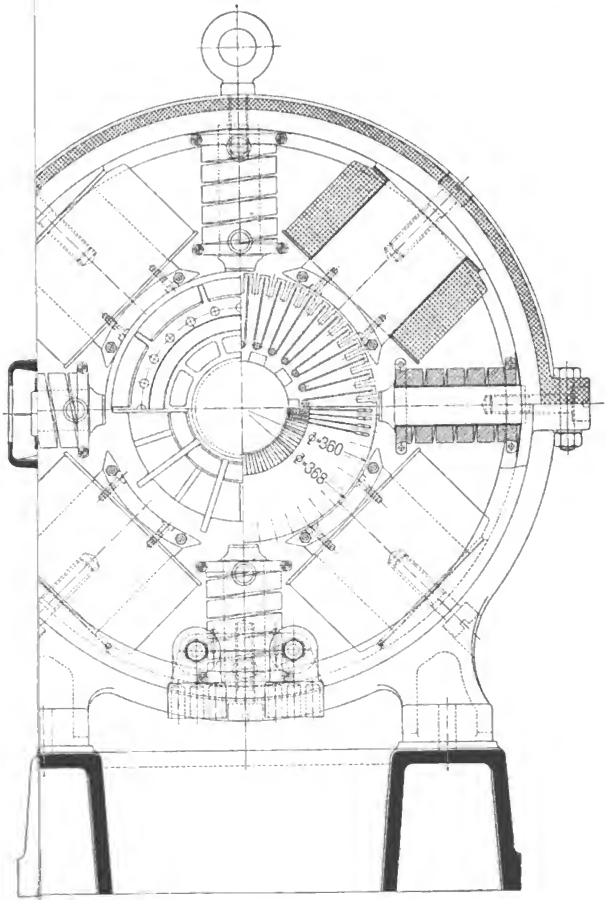
Fig. 2.



Digitized by Google

Digitized by Google

Fig. 2.



Umdr. pro Min.

a. Fig. 5. Nut.

Digitized by Google

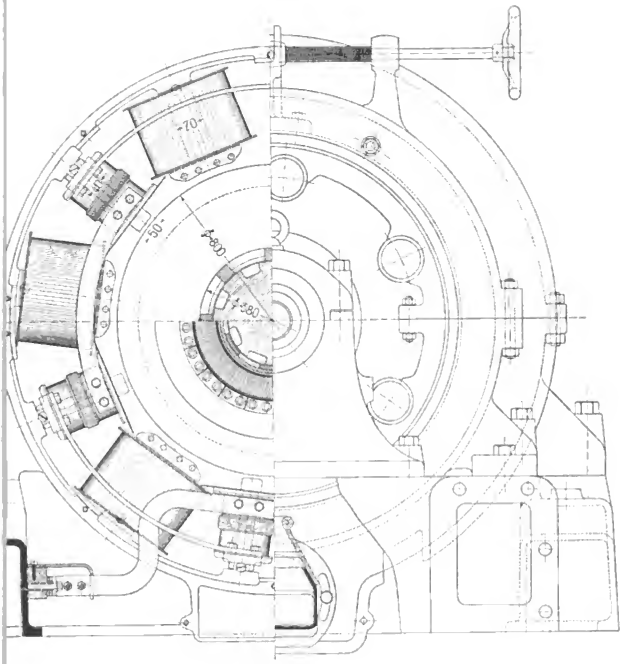
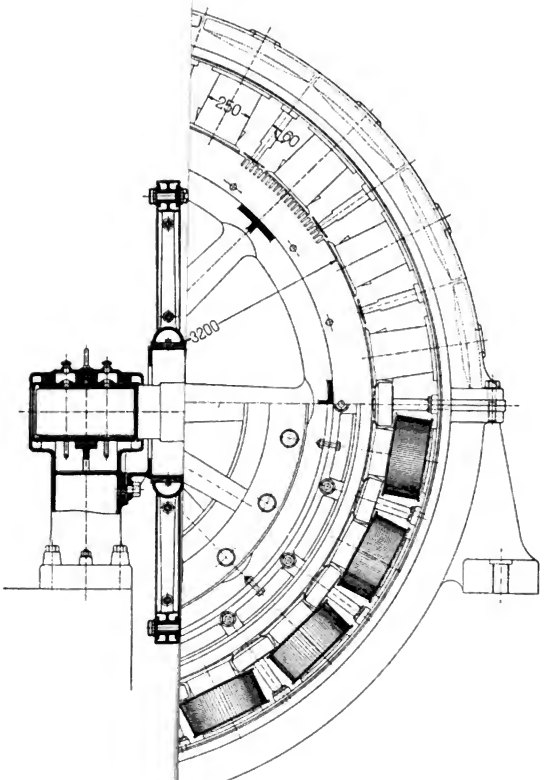


Fig. 2.

in.

Digitized by Google



Min.

Digitized by Google

Fig. 2.

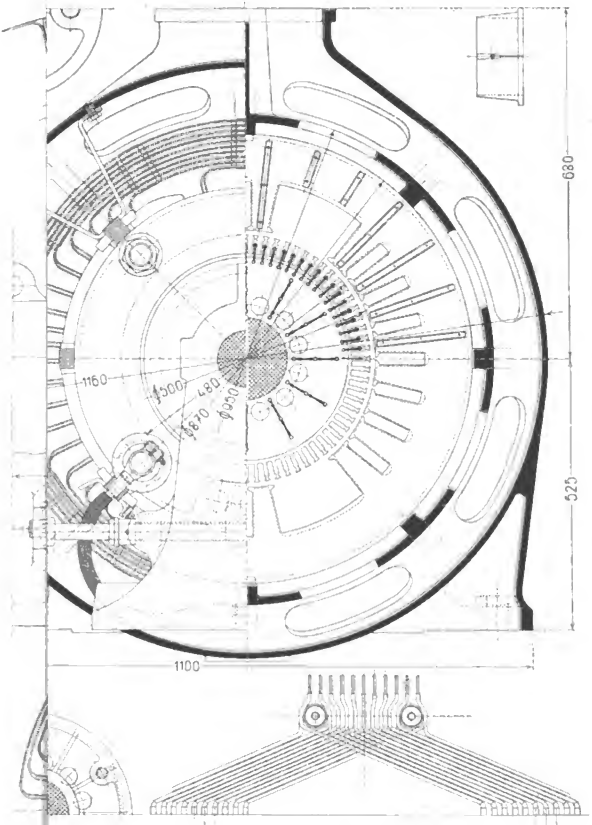


Fig. 8.

pro Min.

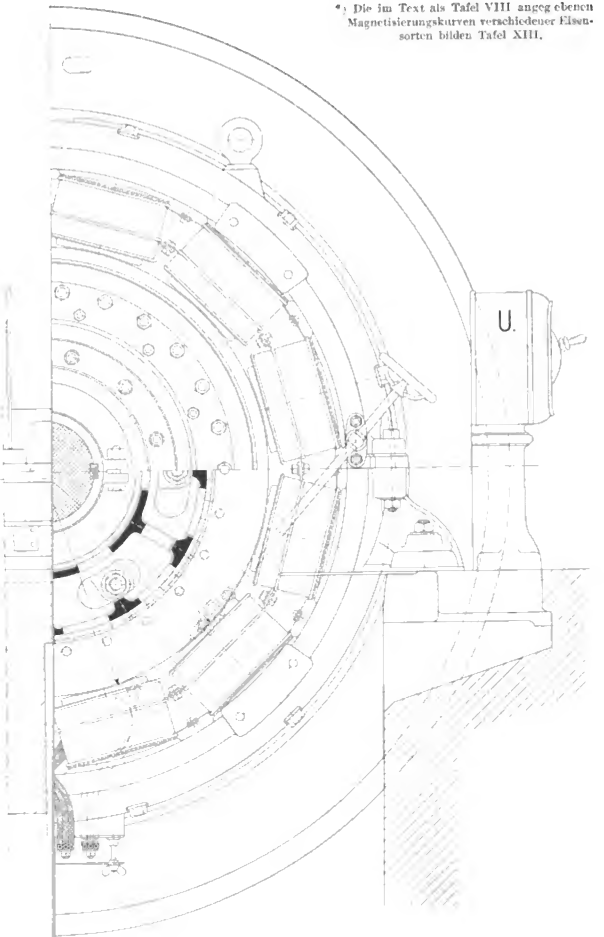
icklung.

wicklung.

Digitized by Google

Tafel VIII *).

*) Die im Text als Tafel VIII angegebenen Magnetisierungskurven verschiedener Eisensorten bilden Tafel XIII.



2.

pro Min.

Digitized by Google

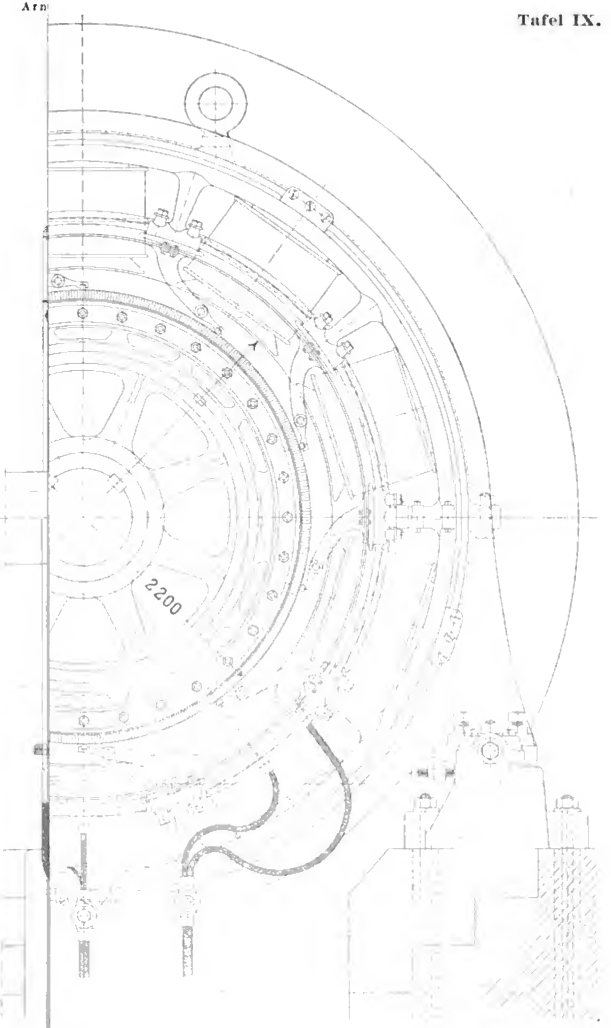


Fig. 2

Min.

= W = Watt V = Volt.

Digitized by Google

Digitized by Google

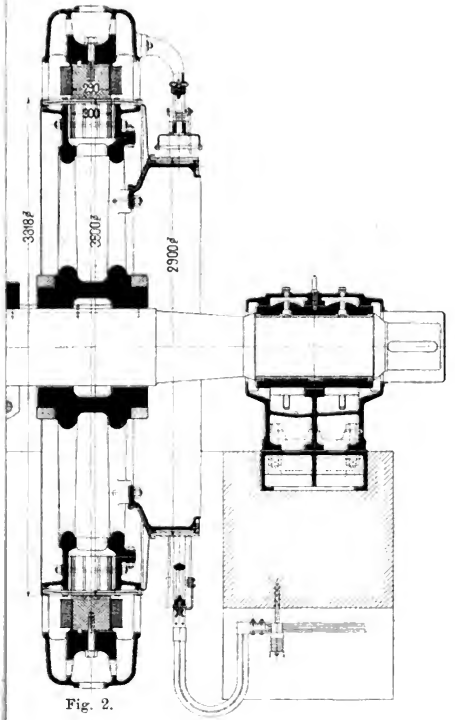


Fig. 2.

Umdr. pro Min.

. Gehäusefuß.

Digitized by Google

Digitized by Google

Fig. 8.

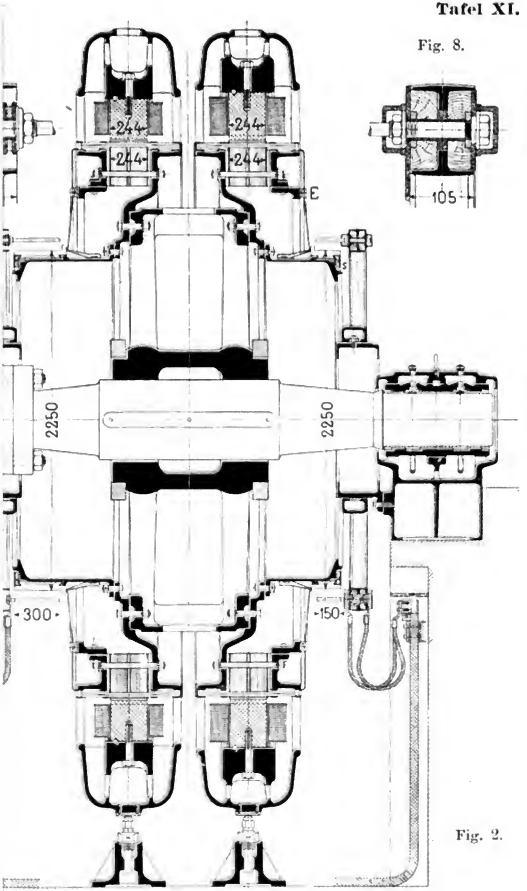


Fig. 2.

Umdr. pro Min.

360 Volt, 1170 bis 1060 Amp.

Nut der Bahnmaschine. Fig. 6. Kommutatorverbindungen.

Digitized by Google

Digitized by Google

Fig. 8.

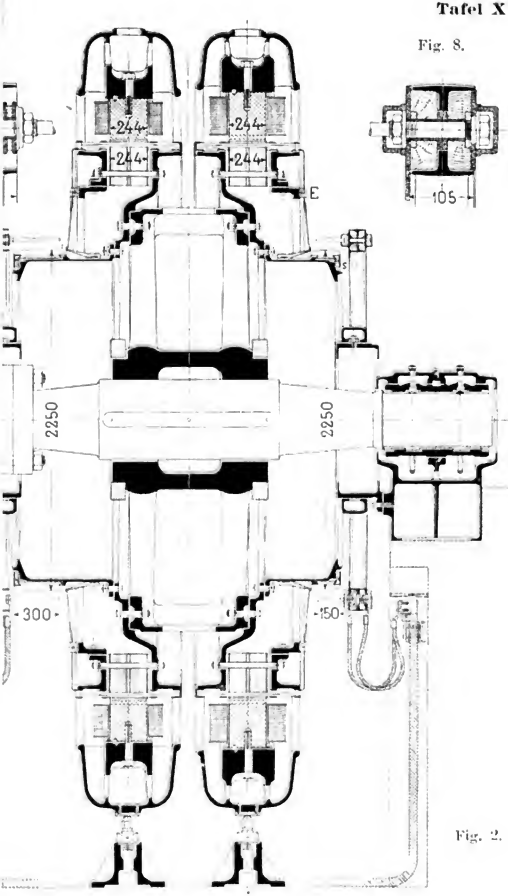


Fig. 2.

Umdr. pro Min.

360 Volt, 1170 bis 1060 Amp.

Kut der Bahnmaschine. Fig. 6. Kommutatorverbindungen.

Digitized by Google

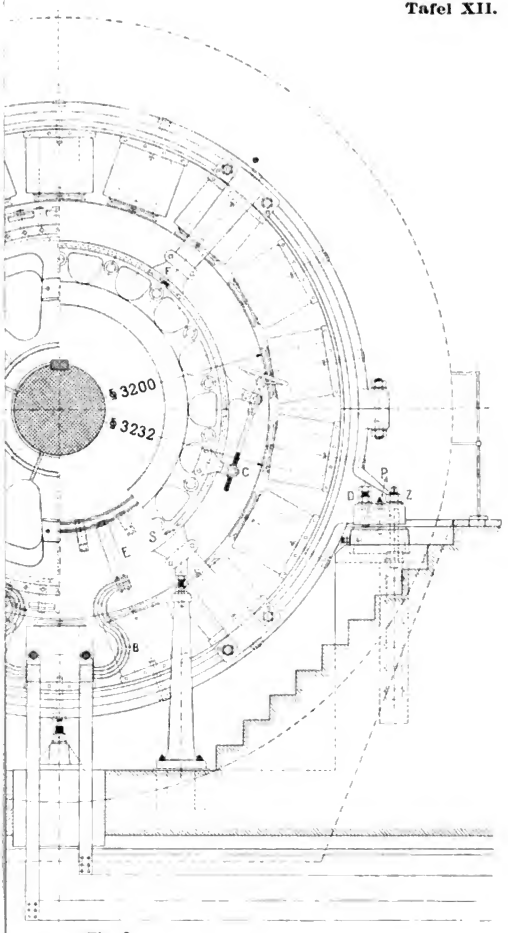
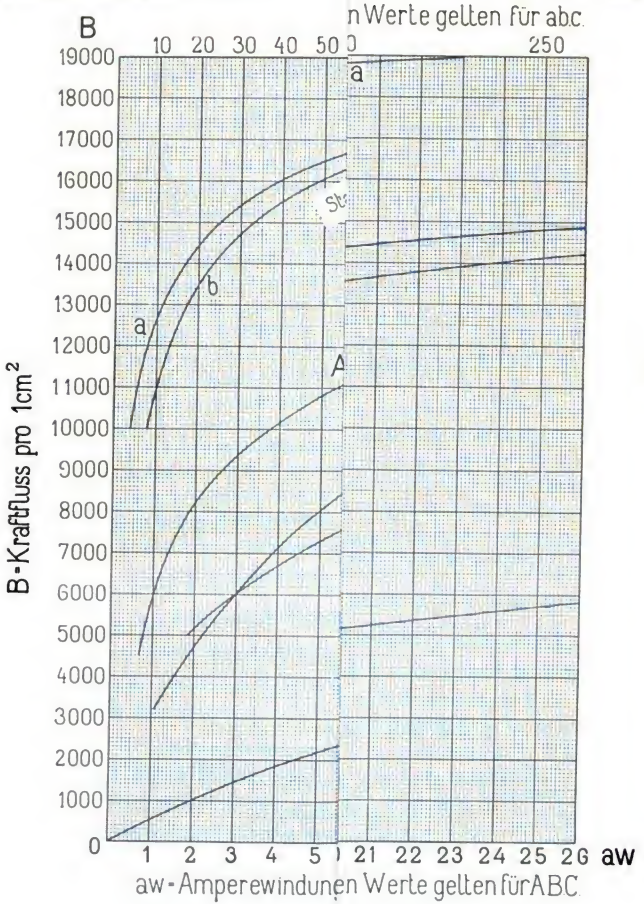


Fig. 2.

o Min.

gen. Fig. 6. Gehäusefuß. Fig. 7. Bürstenhalter. Fig. 8. Nut.

Digitized by Google



Digitized by Google

This book may be kept

FOURTEEN DAYS

A fine of TWO CENTS will be charged for each day the book is kept overtime.

No. 291-B

der in d[redacted] Bandes

Arnol[redacted]chine

Verl[redacted]rlin.

89089711808

b89089711808a

Digitized by Google